

LA FERMENTATION MÉTHANIQUE DES DÉJECTIONS INTÉRÊTS EN ÉLEVAGE

THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard de Lyon

(Médecine-Pharmacie)

et soutenue publiquement le 28 mars 1980
pour obtenir le grade de Docteur-Vétérinaire

par

Nils BEAUMOND

né le 28 mars 1958

à Brunoy (Essonne)



LA FERMENTATION MÉTHANIQUE DES DÉJECTIONS INTÉRÊTS EN ÉLEVAGE

THÈSE

présentée

à l'Université Claude-Bernard de Lyon

(Médecine-Pharmacie)

et soutenue publiquement le 28 mars 1980
pour obtenir le grade de Docteur-Vétérinaire

par

Nils BEAUMOND

né le 28 mars 1958

à Brunoy (Essonne)





DIRECTEUR Monsieur le Professeur COTTEUREAU
 DIRECTEURS HONORAIRES Mrs. les professeurs TAPERNOUX, FLORIOT, FROGET

PROFESSEURS

1°- Pharmacie et Toxicologie	M. LORGUE
2°- Anatomie descriptive, Extérieur, Anatomie appliquée	M. BARONE
3°- Physiologie, Thérapeutique, Pharmacodynamie	M. BOST
4°- Histologie, Embryologie, Anatomie pathologique	M. TISSEUR
5°- Hygiène et Industrie des aliments d'origine animale	M. CHANTEGRELET
6°- Parasitologie et Maladies parasitaires	M. EUZÉBY
7°- Pathologie médicale des Equidés et des Carnivores, Législation vétérinaire	M. FONTAINE
8°- Pathologie médicale du bétail et des animaux de basse cour	M. COTTEUREAU
9°- Technique chirurgicale, Pathologie chirurgicale	M. COULON
10°- Obstétrique, Pathologie de la Reproduction	M. BERTRAND
11°- Pathologie générale, Microbiologie, Immunologie	M. OUDAR
12°- Ethnologie, Zootechnie, Economie rurale	M. FROGET
13°- Botanique appliquée, Agronomie, Alimentation	M. WOLTER
14°- Physique et Chimie biologiques et médicales	M. DELATOUR
15°- Maladies contagieuses, Zoonoses, Législation sanitaire	M. JOUBERT

PROFESSEURS SANS CHAIRE

MM. BOIVIN, DESCHANEL, GASTELLU, JEAN-ELAIN, LAPRAS, Mlle LAVAL,
 MM. LE NIHOUANEN, PRAVE.

MAITRES-ASSISTANTS AGREGES

MM. FRANCK, KECK.

MAITRES-ASSISTANTS

M. BELLi, Mme CHAUVÉ, M. CHOMÉL, Mlle COURSAT, MM. DEMONT, DENOIX, EUZÉBY, FAU, GARNIER, GEVREY, GOUY, JAUSSAUD, LÉGEAY, NEYRET, Mme RACHAIL, M. RICHARD.

ASSISTANTS

MM. BENOIT, BEZÉAUD, Mme CHAPPUIS, MM. CHARLET, Mlle FAUBLEE, Mme FOURNEL, MM. FRESNAY, GENIN, Mme HACHLER, MM. LE FOURNIER, MAY, NGO TAN, Mlle RAGUIN, MM. THIEBAULT, THIEVENAZ.

EXAMINATEURS DE THESE

Président : Monsieur le Professeur VINCENT de la faulté de Médecine de LYON
Premier assesseur : M. le Professeur FROGENT de l'Ecole Nationale Vétérinaire
Deuxième assesseur : M. le Professeur LAPRAS de l'Ecole Nationale Vétérinaire

L'Université Claude Bernard (Médecine-Pharmacie) de LYON et l'Ecole Nationale Vétérinaire de LYON déclarent que les opinions émises dans les dissertations qui leur sont présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elles n'entraînent leur donner ni approbation ni improbation.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR VINCENT
de la FACULTE de MEDECINE de LYON

Qui nous a fait le grand honneur
d'accepter la présidence de notre
jury de thèse.

Hommages respectueux.



Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41553406_0033

A MONSIEUR LE PROFESSEUR FROGET
de l'ECOLE NATIONALE VETERINAIRE de LYON

Qui a bien voulu présenter notre thèse

Qu'il trouve ici l'expression de notre
profonde gratitude pour la bienveillance
qu'il nous a témoignée

A MONSIEUR LE PROFESSEUR LAPRAS
de l'ECOLE NATIONALE VETERINAIRE de LYON

Pour l'honneur qu'il nous a fait en
acceptant d'être membre de notre jury
de thèse.

A MONSIEUR PFULG

Qui nous a reçu et guidé au long de
notre travail

Vifs remerciements.

A Monsieur Stameroff

A ma famille

A mes amis

Plan de notre travail

roduction	p. I
re Partie:le procédé	p. 5
1 La fermentation méthanique et la bioconversion	5
2 Historique	p. 7
3 Biochimie	p.II
4-1 Les differentes étapes de la méthanogénèse	p.II
4-2 Equations chimiques de ces réactions	p.I4
4-3 Conditions nécessaires à la fermentation	p.I7
4-4 Controle de la fermentation.Equilibre d'un digesteur	p.I8
Mode de fonctionnement	p.I9
5-1 Le mode discontinu	p.20
5-2 Le mode continu	p.24
Paramètres influant sur la fermentation méthanique	p.27
6-1 Caractéristiques de la biomasse	p.27
6-2 Température de fermentation	p.3I
6-3 L'agitation	p.34
6-4 Ensemencement bactérien	p.35
Technologie.Exemples de réalisation	p.40
7-1 Installation à chargement discontinu	p.40
7-2 Installation Indienne à chargement continu	p.40
7-3 Installation Suisse à chargement continu	p.42
me Partie:Interêts de la fermentation métha- nique en élevage	p.47
Interêt énergétique	p.48
8-1 Consommation énergétique de l'agriculture en France	p.48
8-2 La production de biogaz	p.49
8-3 Utilisation du biogaz	p.52

2-2 Diminution des nuisances et de la pollution	p.55
2-3 Utilisation du résidu de fermentation comme fertilisant	p.58
2-4 Utilisation du résidu de fermentation dans un but alimentaire	p.61
2-4-1 Fertilisation des viviers	p.61
2-4-2 Alimentation du bétail	p.63
2-5 Intérêt sanitaire de la fermentation méthanique	p.67
2-5-1 Effets de la température sur les micro-orga- nismes	p.70
2-5-2 Relations mathématiques concernant l'action de la chaleur sur les micro-organismes	p.71
2-5-3 Conclusions	p.73
Conclusions	p.77

INTRODUCTION

Avant l'exploitation massive des énergies fossiles, l'agriculture était énergétiquement autonome: grâce à des outils simples, les énergies musculaires de l'homme et des animaux étaient suffisantes pour travailler la terre et en récolter les productions. Celles-ci assuraient l'alimentation des gens et bêtes. Au plan de la matière, le cycle était bouclé grâce au retour à la terre des déchets organiques par l'emploi de fumures naturelles.

Puis avec, d'un côté l'augmentation des populations citadines, de l'autre la diminution de la main d'oeuvre agricole, il fallut tirer de la même surface utile une production toujours accrue, avec de moins en moins de personnel. Ceci impliquait une mécanisation poussée des moyens de travail et de production ainsi que l'emploi d'engrais supplémentaires. L'énergie musculaire ne suffisant plus à ces exploitations, l'on dut avoir recours aux énergies fossiles récemment découvertes et bon marché, qui avaient l'avantage de former les matières premières d'engrais synthétiques efficaces et d'emploi facile.

Le développement de cette technique est menacé de plusieurs côtés: le prix des énergies et des engrais d'origine fossile augmente de jour en jour, un rationnement n'est pas impossible, on parle déjà de leur épuisement, et surtout les énergies fossiles sont devenues un puissant enjeu politique et mettent les pays utilisateurs à la merci d'évènements belliqueux ou spéculatifs sur lesquels ils n'ont pas prise.

Enfin, depuis quelques années, s'ajoute le souci de préserver notre environnement contre une pollution de croissance exponentielle engendrée par une trop grande concentration des productions agricoles et industrielles.

Pour comprendre le problème de l'énergie en 1980, nous pouvons faire une comparaison avec le développement de l'agriculture dans la préhistoire: avant de cultiver la terre et d'élever ses animaux, l'homme vivait de chasse et de cueillette. En matière d'énergie nous sommes toujours dans cette période de cueillette de matériaux combustibles: bois, charbon, pétrole, gaz et uranium. Devant les menaces qui pèsent sur notre approvisionnement énergétique, il est donc grand temps de dépasser le stade de la cueillette pour entrer dans une période de culture et de production décentralisée et contrôlée de l'énergie. Les recherches ont été principalement axées sur une énergie apparemment miracle: le nucléaire. Mais ses dangers et limites sont déjà reconnus et il est de plus en plus important de développer d'autres sources d'énergies permettant une décentralisation réelle des exploitations agricoles ainsi que d'un certain nombre d'activités industrielles, et par là même, de développer un meilleur environnement et qualité de vie.

Au niveau de l'agriculture, cette recherche d'énergies a suscité des études pour développer et améliorer des connaissances et des pratiques anciennes portant entre autre, sur deux plans parallèles de tendances naturaliste et écologique:

*L'agriculture dite biologique ou organique, basée sur l'observation et le respect des lois de la vie,

et qui vise notamment un retour aux pratiques de fumures naturelles. Une telle agriculture est en mesure de sauvegarder notre environnement et de ménager nos ressources en énergie et en matières premières.

* les techniques de la fermentation méthanique qui, parmi les procédés de valorisation des déchets organiques par bioconversion, s'appliquent tout spécialement au domaine agricole et représente donc ce que l'on a coutume d'appeller "l'énergie verte"

Dans ce qui suit, seules ces techniques retiendront notre attention. Après avoir défini et situé la fermentation méthanique parmi les procédés de bioconversion, nous étudierons sa théorie puis, en conservant l'idée fondamentale d'un rendement optimum, les techniques et le matériel que la technologie dite du biogaz met en oeuvre; Dans une deuxième partie, nous exposerons les avantages de ce procédé pour l'implantation et le fonctionnement d'élevages industriels, en particulier aux plans sanitaires, alimentaires et économiques.

1ere PARTIE : LE PROCEDE

Une utilisation à grande échelle de fermenteurs méthaniques ne peut s'envisager que si ceux-ci sont parfaitement au point et surtout si leur rentabilité est démontrée. Les rendements en biogaz de tels systèmes doivent donc être maximum. Or, seule une connaissance approfondie des principes et de la théorie de la fermentation méthanique permet de concevoir et d'utiliser au mieux les "digesteurs".*

1-1 LA Fermentation méthanique et la bioconversion.

On désigne par bioconversion, la transformation de la biomasse en énergie et produits différents de la matière apportée initialement.

Une fermentation est la dégradation de certaines substances organiques par des micro-organismes, souvent accompagnée de dégagements gazeux. (Larousse).

Ce mot fermentation vient du latin *fervere* qui signifie bouillir : il caractérise le dégagement de bulles de gaz observé lorsqu'on abandonne un jus sucré à l'action des micro-organismes. Dans le cas de la fermentation méthanique, le gaz qui se dégage sera donc en partie composé de méthane.

L'ensemble de la bioconversion embrasse des procédés et technologies très nombreux allant de la simple combustion à la fermentation méthanique.

* On nomme digesteur, ou réacteur, l'enceinte close dans lequel se déroule la fermentation méthanique.

La classification de ces procédés est différente suivant les critères retenus. Si l'on considère le degré de transformation obtenu, on peut retenir trois catégories :

a) combustion, incinération et gazéification. Procédés qui produisent exclusivement des énergies thermiques et mécaniques, avec anéantissement de la matière organique, et production d'une faible quantité de cendres minérales. Ces procédés sont de plus source d'une pollution non négligeable engendrée par les gaz produits.

b) La fermentation méthanique, ou technologie du biogaz qui décompose la matière en énergie thermomécanique et en un résidu liquéfié dont une destination simple pourra être la fertilisation de la terre. Décentralisée, cette technique n'engendre pas de pollution, le gaz carbonique provenant de la combustion du méthane retournant à la biomasse par l'intermédiaire de la photosynthèse.

c) Les techniques de fermentation alcoolique et de pyrolyse. Procédés chimiques ou thermiques de dissociation de la matière en énergie thermo-mécanique et en produits nouveaux qui ne retourneront pas directement à la terre. (Exemple : le papier, formé par dissociation chimique des ligno-celluloses.) Toutefois, parmi ces produits nouveaux, ceux qui conservent un caractère ligno-cellulosique, pourront servir de matière première à d'autres procédés de bioconversion, et par ce biais retourner à la terre.

Si, par contre, l'on considère la technicité mise en oeuvre lors de ces procédés, l'on retient aussi trois catégories :

a') Les procédés artisanaux, ne nécessitant ni matériel, ni technicité complexe.

Ex: vinification, distillation, brûlage direct des bois et

railles, des bouses séchées...

Ces procédés donnent en général de faibles rendements et nécessitent parfois de longues manipulations.

b') Les techniques de ferme, qui, grâce à un matériel simple et à des manipulations aisées, ont leur place en milieu agricole, aux sources de production de la biomasse. Les sous-produits de ces techniques peuvent retourner à la terre sans détour.

c') Les techniques industrielles, mises en oeuvre lors de l'incinération et de la pyrolyse, par exemple. Ces techniques, nécessitant un matériel complexe et onéreux, impliquant un personnel qualifié et, le plus souvent, employé à plein temps, sont donc des techniques d'usine, peu propices à une décentralisation et, par conséquent, génératrice de pollution.

L'objectif de la présente thèse est donc nettement défini par les catégories b) et c'). La fermentation méthanique apparaît donc comme un des procédés de bioconversion, c'est-à-dire de récupération de l'énergie solaire emmagasinée par photosynthèse dans les végétaux, propice à une exploitation dans chaque lieu de production de biomasse.

1-2 Historique

La fermentation méthanique est un phénomène observé depuis très longtemps. C'est elle, en effet, qui est à l'origine de la production du "gaz des marais".

Celui-ci fut étudié pour la première fois en 1776 par Volta qui démontra que l'origine en était la fermentation des végétaux sous l'eau, donc en milieu anaérobie. Ce même auteur donna aussi une composition du "gaz des marais" : méthane, gaz carbonique,

vapeur d'eau, hydrogène, hydrogène sulfuré et des mercaptans.

En 1868, Bechamp, travaillant en collaboration avec Pasteur, démontra l'origine bactérienne de cette fermentation. En 1886, Pasteur, entrevoit la possibilité d'utiliser le biogaz pour l'éclairage et le chauffage.

La même année Hoppe et Seyler réussirent à isoler et à cultiver des bactéries méthanogènes.

De 1903 à 1906, des études bactériologiques furent réalisées par Haze et Omeliansky d'un côté, et Sönnren d'un autre. C'est à cette époque que l'explication de la fermentation méthanique permit de comprendre certains accidents médicaux : L'anaérobiose stricte telle qu'elle est réalisée dans la vase des marais, existe aussi dans le tube digestif de certains animaux (panse des ruminants par exemple) et de l'homme. C'est ainsi que l'on comprit pourquoi certaines personnes étaient décédées à la suite d'un traitement d'hémorroïdes par étincelage électrique : le biogaz formé dans le tube digestif de la personne, mis à feu par l'étincelage électrique explosait comme un coup de grisou dans une mine.

La fermentation méthanique est aussi active dans le tube digestif des éléphants, et c'est une des causes de la disparition de ces pachydermes, ceux-ci étant repérés par les chasseurs par le bruit provoqué par l'échappement de leurs gaz intestinaux. En 1936, les études bactériologiques furent reprises à l'université américaine de Berkeley.

Mais l'observation et la connaissance du phénomène ne signifient pas son utilisation. Celle-ci ne fut effective à grande échelle en France, que durant la Guerre de 1939-45, son développement étant provoqué par la carence en pétrole et charbon survenue à cette époque.

Dans notre pays, deux chercheurs : un chimiste : Gilbert Ducelier, et un ingénieur agronome : Marcel Isman, ont permis d'équiper, entre le début de la guerre et la fin des années 50, environ un millier de fermes, de digesteurs construits de façon artisanale. (Science et Vie 1979). Mais les faibles rendements de ces digesteurs, ainsi que la nouvelle abondance des produits pétroliers et leur prix très réduit, firent abandonner ce que, à l'époque on appelait le gaz de fumier.

Toutefois, les études sur la fermentation méthanique ne furent pas délaissées : en 1951, Stadtman et Barker utilisent des substrats marqués au carbone 14 pour déterminer la biochimie des réactions ainsi que les exigences nutritives de chaque espèce bactérienne.

Dans les pays en voie de développement, cette technique n'a pas été rejetée : en Inde, un organisme parapublic, le Gobar Gas Scheme crée en 1939, développe ces techniques et accorde les prêts et subventions nécessaires pour équiper le pays. A l'heure actuelle, il existe dans ce pays près de 70 000 digesteurs, et d'autres dizaines de milliers sont répartis dans d'autres pays d'Asie, et d'Océanie s'inspirant du modèle de l'Inde. En Chine, on parlait, au début de 1979, de 4 millions de digesteurs mis en service depuis 1972. Mais le manque d'informations venant de ce pays ne nous permet pas de vérifier cette assertion. En France, après ce que l'on a appelé la crise de l'énergie, en 1973, les recherches recommençaient avec la création du comité V.E.D.A. (Valorisation Energétique des Déchets Agricoles) par la D.G.R.S.T. Ces études, réalisées par l'I.N.R.A., en collaboration avec le C.N.R.S. et des entreprises privées, ainsi que par le ministère de l'Industrie, ont pour but d'augmenter les rendements et la fiabilité des techniques artisanales éprouvées de 1940 à 1950.

Actuellement, des recherches intensives sont entreprises dans presque tous les pays du monde ; le nom change parfois (Biogaz, Gobar Gas, conversion biométhanique, bioconversion, biomasse, Gaz de fumier, Gaz des champs...) mais les techniques sont semblables.

Aussi, chaque jour, apprend-on l'existence de stations pilotes dans différentes parties du monde. Une d'entre elles mérite d'être signalée par sa taille : celle réalisée par le C. R. A. P.

(California Recovery Anaerobic Process inc.) à Guymon, dans l'Oklahoma (U. S. A.).

Le C. R. A. P. traite chaque jour 200 tonnes de matériaux provenant de 75 000 têtes de bétail. Le gaz produit : 45 000 m³ (à 60 % de méthane, donc environ 27 000 m³ de méthane pur) est acheminé sur plus de 2 000 km de gazoduc à Chicago, où il est utilisé comme gaz de ville.

Il est aussi intéressant de remarquer que des sources naturelles de biogaz peuvent être exploitées. C'est le cas notamment de la source naturelle du lac de Kiwu en Afrique Orientale : on récupère le méthane produit par la fermentation du plancton tombant au fond du lac à la morte saison. Le gaz récupéré est équivalent à 2 000 T de mazout / an.

En France, la station d'épuration d'Achères, qui traite les effluents de Paris (2 millions de m³ / j), produit 140 millions de m³ de gaz par jour.

Partout dans le monde, on s'emploie donc à améliorer les différents types de réacteurs connus jusqu'à présent. Mais l'augmentation des rendements et de la fiabilité de ces techniques passe par une parfaite connaissance du principe de la fermentation méthanique et de sa biochimie, ce à quoi s'emploient actuellement de nombreux chercheurs.

1-3 Biochimie

Une fermentation est une suite de réactions d'oxydo-réduction, productrices d'énergie, dans laquelle les composés organiques servent aussi bien de donneur que d'accepteur d'hydrogène.

Le processus d'oxydation générateur d'énergie se fait non par l'oxygène moléculaire comme dans la respiration, mais par un corps organique capable d'accepter l'hydrogène. A l'exception des hydrocarbures donc, qui ne peuvent plus accepter d'hydrogène, presque toutes sortes de matières organiques peuvent servir de substrat à la fermentation méthanique. Toutefois en pratique, ce sont les matières cellulosiques faiblement lignifiées qui sont les plus utilisées.

Il conviendra donc de décrire un processus d'ensemble, puis de le compléter pour le cas de la cellulose. Nous verrons ensuite les conditions nécessaires à la fermentation ainsi que celles indispensables à l'équilibre d'un digesteur.

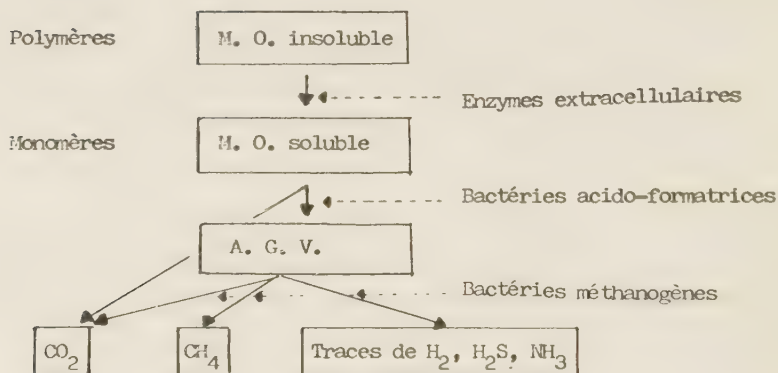
1-3-1 Les différentes étapes de la méthanogenèse

1-3-1-1 Processus d'ensemble.

La fermentation méthanique, dégradation de la matière organique, comporte trois étapes, représentées sur le schéma I.

1ère étape : c'est une hydrolyse de la matière organique par action d'enzymes bactériennes exocellulaires. Cette hydrolyse s'accompagne d'une solubilisation de la matière.

Les enzymes transforment donc les polymères du substrat en les monomères correspondant : sucres, acides gras, acides aminés. L'exemple type en est celui des glucides polymères de structure, dégradés en glucides simples.



A. G. V. : acides gras à courte chaîne, dits acides gras volatiles.

Schéma I : les étapes de la fermentation.

(Verrier 1978, d'après Hill et Barth 1977)

2ème étape : action des bactéries acido-formatrices sur les monomères obtenus lors de la 1ère étape, avec formation d'acides gras volatiles.

On obtient surtout les acides acétique et propionique, mais aussi les acides formique, butyrique et valérique. Cette étape produit aussi des alcools et des aldéhydes, de l'ammoniac, de l'hydrogène, de l'hydrogène sulfuré et du gaz carbonique.

3ème étape : transformation des acides gras volatiles en méthane et gaz carbonique, sous l'action des bactéries méthanogènes. Il faut y ajouter le méthane provenant de la recombinaison du gaz carbonique et de l'hydrogène dégagé au cours de cette même étape.

1-3-1-2- Cas de la cellulose.

La cellulose constituant la principale source de matière fermentescible, son cas a été particulièrement étudié.

Le schéma I précédent a été complété par M.P. Bryant en 1977 qui y a ajouté le groupe des bactéries acétogènes.

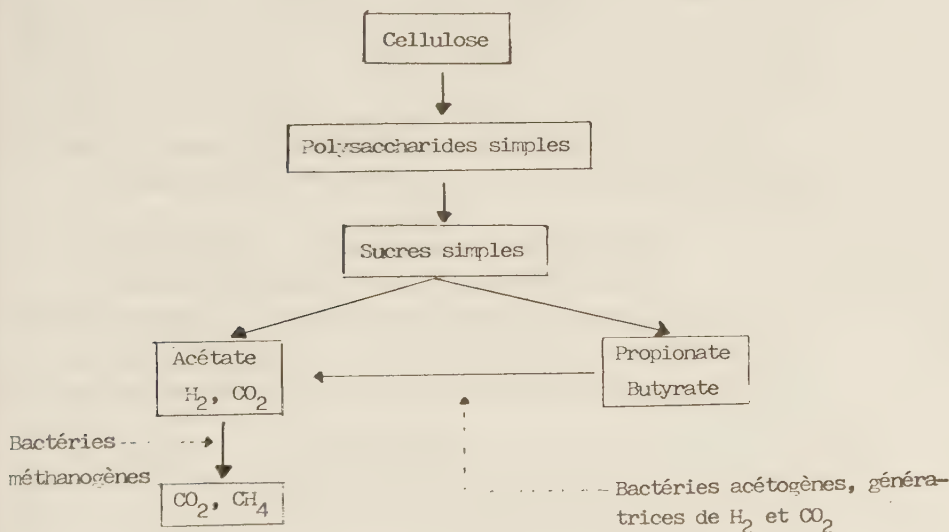
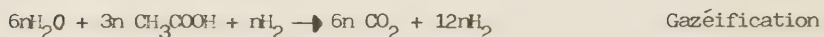
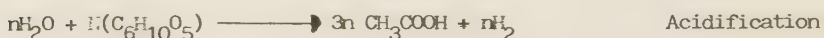
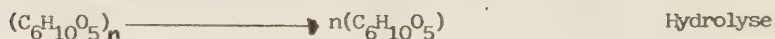


Schéma 2 : Fermentation de la cellulose. (Bryant 1977)

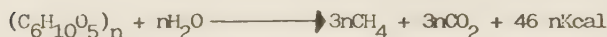
Dans tous les cas, le méthane est donc le produit de l'action simultanée ou successive de diverses populations bactériennes, aéro-anaérobies ou anaérobies strictes.

1-3-2 Equations chimiques de ces réactions.

Au plan des équations chimiques, on peut traduire le schéma de la façon suivante :

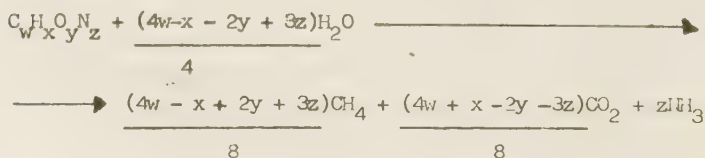


De façon condensée on peut écrire :



L'énergie libérée est faible et en grande partie consommée par les populations bactériennes pour assurer leur propre subsistance.

Théoriquement donc, cette réaction produirait un gaz composé de 50 % de gaz carbonique et 50 % de méthane. En fait, la cellulose n'est jamais pure, et une partie du gaz carbonique libéré est fixée par les bases venant d'autres corps : potasse, chaux, ammoniaque... Une formule générale, faisant intervenir l'azote en plus est donc préférable :



Avec cette équation, nous pouvons voir que les quantités de gaz carbonique et de méthane produites ne sont pas les mêmes.

Pourtant, cette formule générale n'est pas complète, car, dans la matière première, l'on trouve toujours, au moins sous forme de traces, des éléments tels que le soufre, le potassium, ... De plus, même dans le cas de la cellulose pure, les réactions citées ne représentent qu'une part infime de toutes celles qui se passent dans un digesteur, et de toutes celles qui ont été étudiées.

Une étude très précise de la biochimie est difficile car le méthane est le produit de l'action de diverses populations bactériennes très difficiles à isoler. Ces bactéries ont un métabolisme très complexe et peu connu, les substrats utilisés par ces bactéries posent notamment de gros problèmes: par exemple, in vitro et en culture pure, elles n'utilisent que le gaz carbonique et l'hydrogène, alors que in vivo, selon M.P. Bryant (1977), 70% du méthane proviendrait de l'acétate, et 30% de la combinaison du gaz carbonique et de l'hydrogène (Verrier 1978). Selon Prevot (1977), le méthane peut provenir:

*des acides aminés



acide aminé

hydrocarbure

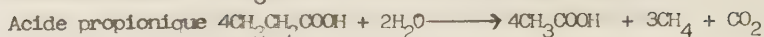
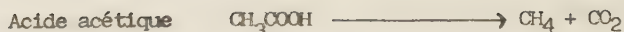
Dans le cas de la glycine, cette réaction donne:



C'est donc un cas de méthanogénèse non spécifique qui implique la présence d'hydrogène et de glycine.

+des corps ternaires (par l'intermédiaire des acides gras)

Ces acides gras sont décarboxylés, ce qui a été prouvé par Buswell et Sollo en employant le carbone I4.



+ du gaz carbonique et du monoxyde de carbone.



En fait, la biochimie de la fermentation méthanique n'en est qu'à ses débuts, car, d'une part comme nous l'avons mentionné ci-dessus, la méthanogenèse à partir d'un substrat pur résulte de l'action de nombreuses populations bactériennes peu connues, et d'autre part, le méthane constitue le produit final de la dégradation anaérobie de toute la matière organique, ce qui multiplie encore le nombre de groupes de bactéries impliquées.

Il existe des organismes capables de fournir directement les précurseurs du méthane à partir de la cellulose.

La méthanogenèse pourrait donc ne nécessiter que deux sortes de bactéries, et un digesteur serait alors plus facile à contrôler. (Le Gall, rapport V. E. D. A. 1979).

La connaissance de la biochimie de la fermentation méthanique est donc étroitement liée à celle de la bactériologie, et on ne peut que déplorer le fait que les collections de bactéries méthanogènes en culture pure ne sont, jusqu'à présent, pas très importantes.

Pourtant, malgré la diversité des substrats et des populations bactériennes impliquées, une composition assez précise des biogaz obtenus peut-être incluse dans les valeurs extrêmes suivantes :

CH ₄	:	54 à 70 %	
CO ₂	:	27 à 45 %	
N ₂	:	0,6 à 3 %	
H ₂	:	1 à 10 %	
CO	:	0,1 %	
O ₂	:	0,1 %	
H ₂ S	:	traces	(Ecotope Group and Parametrix inc 1975)

1-3-3 Conditions nécessaires à la fermentation.

Nous avons vu dans la biochimie que l'équation chimique de la dégradation de la cellulose pure était :



Cette équation ne montre pas toutes les étapes de la fermentation, mais c'est un bilan global des réactions qui a le mérite de montrer le fort besoin en eau de la décomposition de la matière organique. La fermentation méthanique se déroulera donc en milieu liquide, le substrat ayant une concentration maximale en matière sèche, variable suivant les rendements recherchés.

La décomposition de ces équations chimiques montrait de deux principales étapes : l'acidification et la méthanisation, ces deux étapes étant l'oeuvre de deux sortes de population bactériennes très différentes mais ayant quand-même un caractère commun : elles sont anaérobies. Certaines souches de bactéries acidifiantes sont aéro-anaérobies, mais la plupart sont anaérobies strictes, notamment toutes les bactéries méthanogènes, le déroulement de la fermentation méthanique nécessitera donc un milieu anaérobie, par conséquent une construction étanche à l'air. La température peut-être très variable, et sa valeur déterminera les populations bactériennes en action.

La formation de méthane en anaérobiose est faible en dessous de 10°C, mais elle existe. En effet, on a pu prouver l'existence de méthane dans les milieux très froids et même dans les glaciers. Elle devient exploitable aux environs de 15°C et fait alors intervenir les ferments psychrophiles, qui sont ceux à l'origine du "gaz des marais". Il existe ensuite deux maxima de production quand la température augmente. Le 1er se situant vers 37°C fait intervenir les populations mésophiles, qui sont jusqu'à présent les plus utilisées. Ce sont d'ailleurs celles que l'on trouve dans le tube digestif des animaux. Le 2ème maximum se trouve aux environs de 55°C, avec des ferments thermophiles.

Il faut cependant noter que certains auteurs pensent qu'il n'y a pas de maximum de production, mais que celle-ci augmente régulièrement avec la température.

Le choix de la température utilisée sera fonction du rendement recherché, ainsi que du matériel disponible.

1-3-4 Contrôle de la fermentation. Equilibre d'un digesteur

Nous avons vu que la fermentation méthanique comportait deux principales étapes, faisant intervenir deux catégories de bactéries :

- + premièrement, l'acidification avec formation d'acides gras volatiles par action des bactéries acido-formatrices. Ce premier groupe de micro-organismes est caractérisé par une croissance rapide.

- + deuxièmement, action des bactéries méthanogènes sur les substrats préparés par le premier groupe : décomposition des acides gras volatiles en méthane et gaz carbonique. Ce deuxième groupe a, par contre, une croissance lente.

Il va de soi que dans un digesteur (ou réacteur) les deux réactions se font en même temps. Un équilibre doit donc être maintenu entre ces deux étapes.

Cet équilibre de réactions est lui-même conditionné par un équilibre des deux populations bactériennes en cause.

Si la première réaction est trop importante par rapport à la deuxième, il se produit une accumulation d'acides gras volatiles dans le milieu en fermentation, qui peut bloquer la production de méthane : l'accumulation d'acides provoque une baisse de P_H du milieu, ralentissant l'activité des bactéries méthanogènes. L'acidification du substrat en digestion s'accompagne donc d'une diminution de la production de biogaz. Cette diminution peut aller jusqu'au blocage complet de la fermentation si la baisse de P_H est trop importante. D'après Isen (1976), toute fermentation cesse si la teneur en acides gras volatiles atteint 2%. Cet accident arrive notamment lorsque les matières premières du substrat se composent en grande partie de corps peu polymérisés, comme l'amidon par exemple, et qui fermentent donc rapidement, la première étape d'hydrolyse étant très simple.

L'écosystème d'un digesteur est donc d'une complexité extrême, et il est difficile de transcrire toutes les réactions qui s'y produisent en une seule ou même plusieurs équations. Toutefois, des modèles mathématiques ont été proposés pour rendre compte de ces phénomènes et permettre une simulation sur ordinateur. Ces modèles font entrer en ligne de compte les concentrations des acides gras volatiles, des bactéries acido-formatrices et méthanogènes, ainsi que leurs taux de croissance et de destruction. Citons, à titre d'exemple, les modèles élaborés pour un fonctionnement de type continu, par Pfeffer et Liebmann en 1974, et par Hill et Barth en 1977.

1-4 Mode de Fonctionnement.

En 1975, Ecotope Group and Parametrix inc. a défini 4 types de fonctionnement d'un digesteur :

+ Batch feed : mode discontinu : dans ce cas, le contenu du réacteur est introduit et évacué en totalité en

une seule fois, à intervalles réguliers, variables selon la rapidité de décomposition du substrat et généralement compris entre 30 et 100 jours.

+ Plug flow: mode continu: une nouvelle charge est introduite de façon continue ou périodique, tandis que le même volume de matière décomposée est évacué vers l'extérieur. Dans le cas de plug flow, la cuve est constituée d'un cylindre long et de faible diamètre: l'entrée des matières se fait à une extrémité et la sortie à l'autre bout. De cette façon, la matière se déplace horizontalement dans ce type de digesteur et le temps de transit est calculé de façon à ce que le substrat séjourne une période suffisamment longue dans la cuve, période déterminée en fonction du temps de décomposition de la matière dans les conditions de fermentation utilisées.

+ Complete mixing: mode continu aussi. Mais dans ce cas la matière entrante est immédiatement mélangée au contenu de la cuve.

Les particules sortent donc de la cuve en proportion de leur population statistique (Metcalf and Eddy 1972).

+ Arbitrary flow: Mode continu, mais à la différence du type précédent, le mélange des matières à l'entrée dans la cuve n'est que partiel.

Nous ne retiendrons ici que les modes discontinus (Batch feed) et continu de type Complete mixing.

I-4-I Le mode discontinu.

La charge est donc introduite et évacuée en une seule fois, à intervalles réguliers, variables selon le substrat et les conditions de fermentation, température notamment, mais compris en général entre un mois et un mois et demi.

Dans un tel système, la production de biogaz varie au cours de la fermentation de la cuvée.

Tout d'abord, on constate une phase de latence correspondant au démarrage de la production. Cette période, pouvant durer une à deux semaines, peut-être réduite par l'utilisation de deux procédés complémentaires :

+ La préfermentation aérobie, qui commence la lyse des gros polymères en monomères correspondant, et permet donc d'utiliser comme substrat de nombreuses matières, y compris les déchets végétaux fibreux.

De plus la préfermentation aérobie a un excellent rendement thermodynamique, qui permet de chauffer la masse et ainsi de diminuer les dépenses énergétiques correspondant à l'établissement d'une température de fermentation intéressante. Toutefois, cette préfermentation à l'inconvénient de détruire une fraction de la masse organique sans obtenir la production correspondante de biogaz. Ainsi, Isman (1976) pense que la mise en cuve de fumier ayant séjourné deux mois à l'air ne présenterait plus d'intérêt, et conseille une préfermentation de 8 ou 10 jours.

+ L'ensemencement bactérien, qui fera l'objet du paragraphe 1-5-4.

L'utilisation de ces deux moyens permet donc de réduire de beaucoup cette phase de démarrage.

Ensuite, à 35°C, cette production peut passer 5 à 6 jours après le début de la fermentation par un maximum représentant parfois 2,5 fois le volume de la cuve, puis décroître assez rapidement pour ne plus représenter au bout d'un mois que le sixième de ce maximum (Isman 1976). D'autres auteurs pensent qu'à la même température, à un mois, l'on obtient encore la moitié de la production maximale et poursuivent leur fermentation pendant 50 à 60 jours.

Une telle production peut se représenter de la manière suivante :

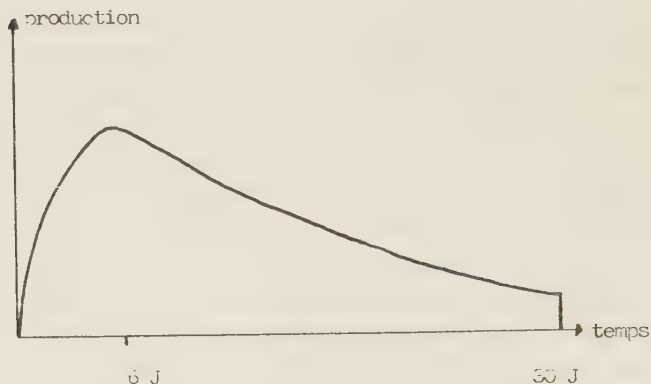


fig. I : production de biogaz d'une cuve en fonction du temps.

Par conséquent, si l'on désire une production continue et régulière en utilisant ce genre de procédé, l'installation comportera nécessairement plusieurs cuves disposées en batterie et travaillant en roulement. Les courbes de production des différentes cuves se superposant, on arrive à un débit de biogaz relativement constant, c. f. figure 2.

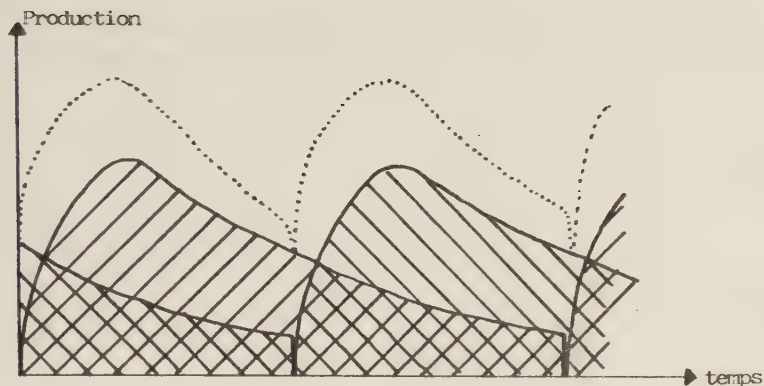


fig. 2 : débit de biogaz produit par l'association
de deux cuves.

Il est évident que plus le nombre de cuves sera élevé, plus la régulation de la production sera bonne. Mais en pratique, il n'y a aucun intérêt à dépasser le nombre de 8 ou 10 cuves par batterie (Isman 1976).

Ce mode de fonctionnement en discontinu offre une certaine facilité d'adaptation qui est appréciée en cas d'utilisation avec différents substrats. Il permet également de réduire les risques de développement de micro-organismes indésirables (Keenan 1978). De plus la production de biogaz ne chute pas à zéro lorsqu'un accident survient dans une des cuves, les autres continuant une fermentation normale. Ce type de digesteur permet en outre la fermentation de matières végétales comportant des éléments plus ou moins gros et fibreux.

Cependant, ce mode de fonctionnement n'offre pas que des avantages. Certains auteurs pensent qu'avec des communautés bactériennes extrêmement complexes, ce n'est pas le travail en discontinu, dans les conditions physiques et chimiques très changeantes, qui présente la meilleure condition de fiabilité dans le temps.

De plus ces systèmes discontinus impliquent l'utilisation de levains, soit naturels, ce qui annule l'avantage cité par Keenan, de la suppression des risques de développement de micro-organismes indésirables, soit artificiels, qui posent encore de nombreux problèmes (c. f. 1-5-4).

Souvent ces cuves fonctionnant en discontinu ne comportent ni chauffage ni agitation. La fermentation s'effectue donc à température variable, en général proche de l'optimum mésophile de 35°C, et les rendements en biogaz sont assez faibles.

Enfin, la multiplication des cuves, nécessaire à une production de biogaz continue, en fait un procédé encombrant et coûteux. De plus, ce système, qui en cuve unique réduit les manipulations par rapport au procédé suivant, les augmente en définitive quand l'installation comporte plusieurs digesteurs.

Ceci fait que de plus en plus, et partout dans le monde, on s'oriente peu à peu vers des réacteurs fonctionnant en mode continu.

1-4-2 Le mode continu.

Il est probable qu'un système continu, dans la pleine acception du terme, n'existe pas vraiment. En fait, on se contente de procédés semi continus dans lesquels le chargement et la vidange sont réalisés une fois par jour. La plupart des installations en service dans le monde sont de ce type. Dans quelques rares excep-

tions, les opérations de chargement et de vidange sont automatisées et ont lieu de façon régulière, par exemple quelques minutes toutes les demi-heures.

Une installation fonctionnant en mode continu peut donc ne comporter qu'une seule cuve.

Le temps de rétention hydraulique des matières dans le digesteur est donné en jours par le rapport suivant :

$$\frac{V1 \text{ volume du digesteur}}{V2 \text{ volume quotidiennement introduit}} = \text{temps de rétention}$$

V1 et V2 doivent être exprimés dans la même unité.

De cette manière, pour avoir un temps de rétention de 30 jours par exemple, le volume de la cuve devra être 30 fois supérieur au volume de matière à introduire quotidiennement.

Un système en continu évite les phases de démarrage du système précédent et permet d'obtenir des conditions physico-chimiques relativement constantes, conditions de fiabilité et de stabilité dans le temps. Au plan de la bactériologie, dans les systèmes continus, on observe une prédominance des bactéries méthanogènes plus importante que dans les digesteurs fonctionnant en mode discontinu (Rapport V.E.D.A. 1979). Ceci serait dû à l'hétérogénéité du milieu d'un système non infiniment mélangé, qui provoquerait l'apparition d'un gradient méthanogène.

En France les différents auteurs ont toujours été adversaires du système continu, car on pensait qu'il ne pouvait s'appliquer qu'à des substrats très liquides, dont la concentration en matières sèches ne dépassait pas 10 %. De plus, le substrat ne devait comporter aucun élément fibreux qui risquaient de former une croûte à la surface de la matière en fermentation, et devait donc être broyé avant l'entrée dans la cuve et brassé pendant la

fermentation . Toutes ces opérations affectaient le bilan énergétique de la digestion. De plus la faible concentration du substrat posait le problème de la résorption de cette énorme masse liquide.

Or depuis quelques temps, des expériences très concluantes sont réalisées en continu avec des substrats à forte teneur en matière sèche. C'est ainsi qu'au Technion de Haifa (Israël), Marchaim (1978), travaillant en continu et en thermophilie, a fait fermenter des substrats contenant jusqu'à 18 % de matière sèche. Avec un temps de rétention de 6 jours, il a obtenu plus de 8 volumes de gaz / volume de digesteur.

L'augmentation de la concentration du substrat est un facteur intéressant car il permet de diminuer le volume de la matière à traiter, donc celui du réacteur et par conséquent son coût. La diminution du volume du réacteur correspond aussi à une diminution de la surface extérieure, donc de la surface de déperdition calorifique.

Toutefois, l'eau est nécessaire, nous l'avons vu, aux réactions chimiques de la fermentation. Il faut donc trouver un compromis entre la concentration, la cinétique de production et les déperditions calorifiques.

Les installations fonctionnant en régime semi-continu nécessitent des manutentions simples, facilement automatisables, et sont susceptibles de subir une modularisation très poussée, très économique, qui conduit également à un montage possible en batterie, en cas d'augmentation de cheptel par exemple. Cependant, elles sont aussi plus sensibles aux variations du substrat et des conditions de fermentation. Il faut notamment prévoir un système de préchauffage de la matière avant l'introduction dans le réacteur, pour éviter les chocs thermiques. Ces installations nécessitent donc une instrumentation sûre et étudiée, permettant une surveillance simple des phénomènes se déroulant à l'intérieur de la cuve.

Mais, que l'on adopte un fonctionnement de type continu ou discontinu, la fermentation méthanique est la même et un grand nombre de paramètres interviennent sur le déroulement du processus. L'étude de ceux-ci permet d'obtenir les rendements optimums d'un digesteur.

1-5 Paramètres influant sur la fermentation méthanique.

Ceux-ci, nous l'avons dit, sont très nombreux. Nous nous limiterons ici à l'étude de ceux dont l'influence a été prouvée et étudiée.

1-5-1 Caractéristiques de la biomasse.

Le terme "biomasse" est employé ici au sens large, et désigne la masse vivante (sens strict) ainsi que ses déchets.

A l'exception des hydrocarbures, presque toute matière organique est susceptible de donner lieu à la fermentation méthanique : pailles de céréales, herbes, feuilles mortes, déchets urbains et boues des eaux d'égout, algues... et déjections animales. Nous ne retiendront ici que ces dernières.

Mais si l'on considère des déjections de ruminants (bovins, ovins), d'omnivores (porcins) ou des fientes de volailles, la composition de ces matières fécales est différente : le taux de matières sèches est variable, ainsi que celui des matières organiques volatiles. La vitesse intrinsèque de décomposition va donc varier suivant l'espèce animale, ainsi que suivant son alimentation ; Ce dernier facteur, l'alimentation, n'a malheureusement pas été étudié à notre connaissance.

En 1976, Sharma et Paul ont fait une étude comparative des différentes déjections animales et de la production de biogaz correspondante. Ils ont travaillé en mode discontinu, à des températures variant de 27°C à 35°C ; les rendements ne sont donc pas très

bons, mais l'intérêt de l'expérience est de montrer les variations de production en fonction du substrat.

Dans un premier tableau ils donnent la composition des matières premières.

	M. S. en %	M. O. en % de la M. S.
Bouses de vaches	18	84
Fecés de moutons	32	81
Fecés de chèvres	32	78
Fecés de porcs	45	72
Fientes de volailles	47	65

Tableau I : Composition de différentes déjections animales. (Sharma et Paul 1976).

Il est à noter qu'au plan de cette composition des matières premières, Drevon et Isman (1977) ne donnent pas les mêmes résultats.

	M. S. en %
Bouse de vaches	20
Fecés de moutons	30
Fecés de porcs	15
Fientes de volailles	15

Tableau 2 : Composition de différentes déjections animales. (Drevon et Isman 1977).

Ceci prouve, une fois encore, la difficulté d'effectuer des expériences dans des conditions définies et standardisées, la composition des fécès pouvant varier énormément en fonction de l'alimentation reçue.

Néanmoins, les variations de production de biogaz en fonction des substrats sont les mêmes, à quelques légères variations près, quels que soient les auteurs.

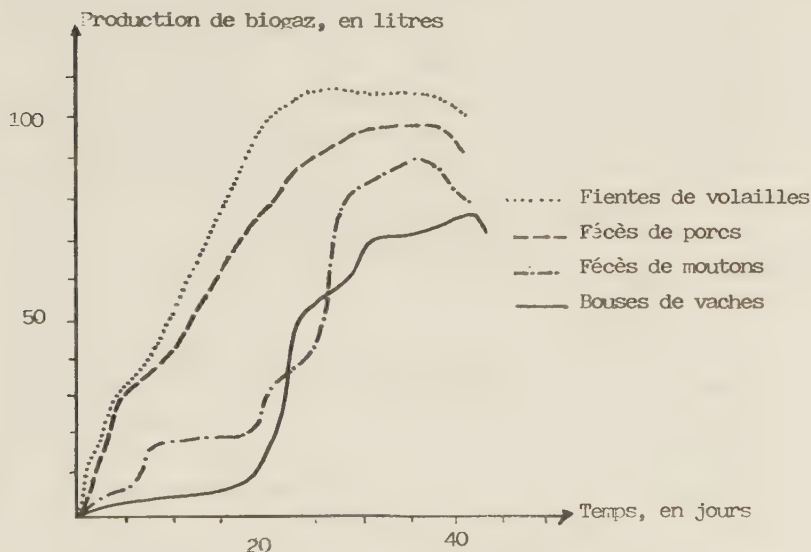


Fig. 3 : Production de biogaz en fonction du substrat.
(Sharma et Paul 1976)

Il faut donc remarquer que les déjections les plus productives sont les fientes de volailles et les lisiers de porcs. De plus, ces mêmes matières premières ont l'énorme avantage d'être rapidement digérées, en effet, la production de biogaz débute environ trois heures après la fermeture de la cuve, alors que la bouse de vache nécessite un temps de latence de une à deux semaines au démarrage de la cuve.

Enfin, ces mêmes auteurs analysent les biogaz produits à partir de ces différentes matières premières, et montrent que celui fourni par les lisiers de porcs et les fientes de volailles sont les plus riches en méthane. (Voir tableau 3)

Substrat	CO ₂ %	CH ₄ %
Bouses de vaches	35,3	50,1
Fécès de moutons	29,2	54,0
Fécès de chèvres	22,8	53,2
Fécès de porcs	26,5	56,0
Fientes de volailles	25,4	56,0

Tableau 3 : Analyse des différents bioqaz en fonction des substrats. (Sharma et Paul 1976).

Au plan de la composition du substrat, le rapport C / N doit être cité. De sa valeur dépend le pH du milieu. Si l'on veut éviter les risques d'accumulation d'ammoniaque inhibitrice de la fermentation méthanique, ce rapport ne doit pas être inférieur à 5 (Verrier 1978). La limite supérieure est en général fixée à 30 (Les Auerbach 1973, Drevon et Isman 1977). Mais cette opinion n'est pas unanime, Ghosh et Klass (1976) ont fait varier ce rapport de 12 à 140 sans que la production de bioqaz en soit nettement affectée.

Le rapport C / N influe donc sur le pH du milieu ; or nous avons vu que celui-ci pouvait fortement affecter l'activité bactérienne. Suivant les auteurs, la limite acide à ne pas dépasser serait de 5 (Raibaud et Clara, rapport V. E. D. A. 1979) à 6,5 (Verrier 78), mais dans tous les cas, la limite basique se situe autour de 7,5.

Il faut aussi mentionner le fait que suivant l'alimentation des animaux ou les traitements qu'ils reçoivent, on peut retrouver dans les fèces des substances qui sont inhibitrices de la fermentation : ions sulfates, résidus d'antibiotiques...

Enfin, suivant le mode d'élevage et de récupération des déjections, nous aurons à traiter soit des fumiers, soit des lisiers, c'est-à-dire des matières à présentation soit solide, soit liquide. En cas de matières solides, un élément important à prendre en considération sera la taille des particules qui va déterminer la surface d'attaque bactérienne de la matière organique du substrat, et par conséquent, la rapidité de dégradation. La différence entre fumiers et lisiers influe aussi sur la concentration du substrat en matières sèches, qui conditionne le type de digesteur et de matériel annexe à choisir.

1-5-2 Température de fermentation

C'est un facteur très intéressant car c'est celui sur lequel il est le plus facile d'agir de façon contrôlable sinon économique. De plus, le choix d'une température déterminera de la même manière le choix des espèces bactériennes agent de la fermentation méthanique.

Nous avons vu qu'il existe trois plages de températures définies, chacune correspondant à une communauté déterminée de bactéries, soit :

- + bactéries psychrophiles, opérant à des températures de 0°C à 20°C, ayant leur maximum d'efficacité à 15°C. Elles ne sont pas utilisables vu le faible rendement en biogaz des fermentations qu'elles provoquent.

- + bactéries mésophiles, vivant et se reproduisant à des températures allant de 20°C à 40°C, avec un optimum à 37°C. Ce sont actuellement les plus utilisées dans les digesteurs en service.

- + bactéries thermophiles, dont le champ d'activité

se trouve entre 40°C et 60°C avec un optimum de 54°C.

D'après la documentation récente, il n'existe pas de gamme d'efficacité entre 30°C et 70°C, et l'on parle seulement de deux maximums à 37°C et 54°C.

Actuellement donc, les bactéries méthanogènes mésophiles sont les plus utilisées, elles constituent d'autre part le groupe contenant le plus d'espèces connues. Elles sont en outre d'obtention moins délicate que les bactéries thermophiles du simple fait de leur champ d'activité : le tube digestif de nombreux animaux en contient un grand nombre, ce qui explique l'incendie ayant suivi la catastrophe récente d'une vache météorisée au Danemark.

Enfin, le temps nécessaire à la fermentation méthanique mésophile étant de 30 à 45 jours, une production intéressante de biogaz nécessite un réacteur de grand volume, ce qui conduit à une exploitation moins "nerveuse", moins sujette à des perturbations provoquées par des substances réfractaires ou inhibitrices.

Il importe, dans ces réacteurs fonctionnant en mésophile, de bien conserver la température optimum de 37°C. En effet, comme l'ont montré Drevon et Isman (1977), une faible variation de la température entraîne une grande variation de la production de biogaz, voir tableau 4. Cette étude a été faite avec un digesteur fonctionnant en discontinu.

température, °C	10	20	25	30	35	37
biogaz, m ³ /t de foinier.jour	0,05	0,3	0,7	1,5	2,0	2,46

tableau 4 : production de biogaz en fonction de la température (Drevon et Isman 1977)

Toutefois, toutes les expériences tendent à montrer qu'une fermentation méthanique en thermophilie conduit à une dégradation plus poussée de la matière organique, donc à un rendement en biogaz plus important.

En 1977, Pfeffer, a montré l'effet de l'élévation de la température au dessus de 37°C sur le taux de dégradation de la matière organique. L'étude a été réalisée avec un digesteur fonctionnant en continu, et pour un temps de rétention de 6 jours.

Température, °C	35	40	45	50	55	60
Taux de dégradation, %	26,4	33,6	29,0	38,6	42,6	46,6

tableau 5 : taux de dégradation en fonction de la température (Pfeffer 1977)

De même des expériences conduite en 1977 au Technion de Haifa (Israël) par l'équipe de la Kibbutz Industrie Association ont mis en évidence, au laboratoire, des productions de 8 volumes de biogaz par volume de réacteur et par jour, en thermophilie, et en mode continu avec un temps de rétention de 6 jours.

Les températures thermophiles s'avèrent donc beaucoup plus efficaces.

Mais, le reproche fait communément à la fermentation en thermophilie est, bien entendu, l'énergie complémentaire nécessaire au maintien d'une température plus élevée. En effet comme nous le savons déjà, la fermentation méthanique est très peu exothermique, donc si la température ambiante est inférieure à celle désirée pour le digesteur, ce qui est toujours le cas en thermophile, il devient nécessaire de recourir au chauffage et au calorifugeage des cuves. Toutefois, il faut remarquer qu'un digesteur conçu pour ce régime et pour fonctionner avec des substrats à haute teneur en matières sèches (essais réalisés avec 18 % de matières sèches en Israël), peut-être au moins 5 à 6 fois plus petit, voire d'avantage, qu'un autre qui conviendrait au régime mésophile.

D'autre part, ce n'est pas la différence de température entre la mésophilie et la thermophilie qu'il faut prendre en considération, mais les différences de ces deux températures par

rapport à la température externe. Si celle-ci est de 5°C, nous aurons :

$$37 - 5 = 32^{\circ} \text{ dT}_I$$

$$54 - 5 = 49^{\circ} \text{ dT}_2$$

Or il est certainement plus facile d'isoler et de chauffer un digesteur de 50m³ pour un dT₂ de 49°C, qu'un autre de 300m³ pour un dT_I de 32°C. L'argument du chauffage des cuves en thermophilie n'est donc pas si important.

Enfin, en matière de chauffage des biorasses en fermentation, ce ne sont pas tant les variations de température qui sont nuisibles à la vie et au travail des bactéries, car celles-ci ont un fort pouvoir d'adaptation, mais la rapidité de ces variations qui, si elle est trop importante, peut-être mortelle. Or, lors d'une fermentation mésophile, avec un temps de rétention de trente jours, il est imaginable d'introduire chaque jour un trentième du volume de la cuve, soit 3,3 % de la masse présente, à la température externe, le choc thermique correspondant serait très faible et ne risquerait pas d'entraver la bonne marche de la fermentation. Par contre, en thermophilie, avec un temps de rétention de 6 jours, il est exclu d'introduire chaque jour un sixième du volume, soit 16,6 % de la masse, toujours à la température externe. Par conséquent, il en ressort la nécessité de toujours préchauffer la fraction de biomasse à introduire dans un milieu en fermentation thermophile.

Mais ce préchauffage peut s'effectuer grâce à un apport thermique gratuit tel que la préfermentation aérobie par exemple, ou la récupération des calories de la matière sortante, ou, au pire, en utilisant une partie du gaz produit.

1-5-3 L'agitation

Une certaine agitation est pratiquement obligatoire dans la masse en fermentation, et spécialement dans les digesteurs fonctionnant en continu. En effet, une homogénéisation du milieu

semble nécessaire tant du point de vue des divers constituants que de celui de la température (Verrier 1972). Elle surtout nécessaire en fonctionnement continu pour empêcher la formation rapide d'une croûte superficielle, zone de flottement de substances spécialement légères telles que la paille de fumier non encore digérée.

Plusieurs méthodes sont possibles pour agiter et mélanger la masse en fermentation :

- + moyens mécaniques : pales tournant à l'intérieur du digesteur, vis sans fin...

- + par recirculation à l'aide d'une pompe, d'une quantité plus ou moins importante de la biomasse, avec ou sans passage par un échangeur de chaleur (profiter de l'eau de refroidissement d'un moteur pour réchauffer la biomasse par exemple)

- + par recyclage d'une partie du biogaz formé.

La fréquence optimale de l'agitation est quant à elle variable suivant les auteurs : Ghosh et Klass (1976), en augmentant la vitesse de rotation de l'agitateur de 90 à 180 tours par minute, ont augmenté la production de biogaz d'un tiers. Par contre, les ingénieurs Israéliens préconisent une demi-heure de mélange toutes les 24 heures, mais répartie en plusieurs séquences automatiques (communication personnelle).

Pour être vraiment efficace, une telle agitation ne doit pas simplement assurer une homogénéisation locale, mais doit solliciter toute la masse présente et offrir à l'attaque bactérienne des substances fréquemment renouvelées.

1-5-4 Ensemencement bactérien

Mettre de la cellulose, ou toute autre matière organique en milieu anaérobie à 37° ou 54° C, et pH de 6 à 7,5, ne suffit pas pour que la fermentation méthanique démarre. Nous avons vu en effet que cette dégradation de la matière était l'oeuvre

de bactéries, notamment des méthanogènes.

Dans le cas de substrats constitués de déjections animales, bien souvent ces bactéries sont présentes, et l'ensemencement n'est pas nécessaire, surtout pour un travail en mésophilie.

Toutefois, si l'on veut un démarrage assez rapide de la production de biogaz, on a tout intérêt à ensemer la cuve. Ceci est spécialement nécessaire si l'on veut travailler en thermophilie. Il faut signaler que cet ensemencement, ou inoculum, n'est en fait indispensable que pour un procédé discontinu, car dans un tel cas, il faut redémarrer la fermentation à chaque fois que l'on charge la cuve. L'inoculum devait alors permettre de supprimer les phases de latence et d'assurer une cinétique de réaction rapide, garantie d'un rendement correct.

Par contre, dans le cas d'un digesteur fonctionnant en mode continu, le démarrage se fait une fois pour toutes lors de la mise en service du réacteur et par conséquent, il suffit d'attendre quelques jours pour que les populations méthanogènes aient le temps de croître par elles-mêmes.

Deux types d'ensemencements bactériens sont envisageables : l'un est naturel, l'autre artificiel, provenant de cultures en laboratoire.

1-5-4-1 Ensemencement naturel

C'est le système du pied de cuve : on conserve d'un cycle à l'autre un fond de cuve où les souches bactériennes sont déjà sélectionnées.

Ceci peut fonctionner très bien si d'une cuvée à l'autre on ne change pas de biomasse, car des substrats différents impliquent des bactéries différentes, il n'existe en effet pas de levain unique.

D'autre part une conception inadéquate de la cuve peut conduire à l'évacuation du substrat actif et au maintien d'un pied de

cuve inerte, dépourvu de bactéries, qui s'expliquerait par le fait que dans chaque cuve on observe un dépôt de matières décantées ne contenant que très peu de bactéries.

1-5-4-2 Ensemencement par un levain de culture.

Ceci devrait permettre de diminuer les problèmes d'instabilité génétique et d'éviter l'apparition de populations mutantes (Keenan 1979).

Depuis longtemps déjà, les microbiologistes étudient les bactéries méthanogènes, et ceci pourrait permettre de sélectionner des souches pour préparer des levains. Mais les bactéries méthanogènes sont des organismes très particuliers, et certains auteurs voudraient même créer pour elles le règne des Archéobactéries.

Quelques caractères plaident en cette faveur :

Absence de peptidoglycane (caractéristique de la paroi des bactéries)

Absence de cytochromes

" de flavines

" de quinones

Présence de composés originaux coenzyme H₂F 420...

De nombreux problèmes sont donc posés par leur métabolisme : nature du transporteur d'électrons (puisque'il n'y a ni flavines, ni cytochrome, ni quinones), d'où vient leur énergie, comment les molécules de gaz carbonique sont-elles réduites en méthane, comment se fait l'assimilation du gaz carbonique, de l'acétate?... (Le Gall, rapport V.E.D.A 1979).

Toutes ces questions prouvent que la microbiologie des bactéries méthanogènes n'en est encore qu'au stade des débuts. D'ailleurs, même au plan de la taxonomie, les microbiologistes ne sont pas d'accord entre eux.

Genres	Sous genres	Genres
Eubactérium (2)	Méthanococcus (2)	Méthanococcus (1)
Clostridium (1)	Méthanosarcina(2)	Méthanosarcina (1)
Plectridium (2)	Méthanobactérium (2)	Méthanobactérium (4)
Terminosporus (1)	Méthanospirillum (1)	Méthanospirillum (1)
	Méthanobacillus (1)	
D'après.....	Prévot 1977	Zeikus 1977
() nombre d'espèces décrites par ces auteurs.		

Tableau 6 : Genres et sous genres des bactéries méthanogènes selon deux auteurs.

Zeikus, en 1977, a décrit certaines caractéristiques des souches méthanogènes étudiées :

+ Substrats utilisés par toutes les souches : hydrogène et gaz carbonique.

+ Autres substrats utilisés par certaines souches : acétate, formate, méthanol.

+ Exigences nutritionnelles de toutes les souches : ammoniacque.

+ Autres exigences nutritionnelles : acides aminés, hydrogène sulfuré, acétate.

+ Température optimale de croissance : 20° à 70°C.

+ Temps de génération en culture pure : 3 à 17 heures.

La poursuite de ces recherches pourra permettre la "domestication" des bactéries méthanogène nécessaire à la production de levains. Cette technique de production en laboratoire de levains de culture est très tentante mais elle pose des problèmes : il faudrait pouvoir produire un levain mixte contenant à la fois des bactéries acidogènes et des bactéries méthanogènes, car si ces dernières n'ont pas à leur disposition les substrats qui leurs sont nécessaires, le levain est inutile.

Prevot, en 1977, cite une bactérie, *Plectridium cellulolyticum*, qui est à la fois cellulolytique et méthanogène. Thermophile, elle digérait la cellulose en 6 jours.

Un autre problème est celui posé par les nombreuses interactions microbiennes qui doivent avoir lieu dans un milieu comme la biomasse en fermentation. Ceci fait que de nombreux auteurs sont sceptiques sur les possibilités réelles d'implantation dominante d'un levain exogène vu les antagonismes microbiens régnant dans l'écosystème.

En continu, un ensemencement au démarrage pourrait être efficace, le digesteur n'évacuant qu'une faible part de la population microbienne qui s'y est implantée. La majeure partie y reste en permanence et sa prolifération est assurée par l'apport quotidien d'un matériau biodégradable. De plus, à intervalle régulier, tous les mois par exemple, on peut imaginer de réintroduire une dose d'inoculum.

Pour éliminer ce facteur d'interactions microbiennes, certains auteurs ont proposé de stériliser la biomasse à fermenter, notamment par irradiations.

Bien que, en fonctionnement discontinu, ce soit la technique du levain endogène, ou pied de cuve, qui semble préférable, les progrès en bactériologie, et même en génétique bactérienne pourraient permettre d'augmenter les productions de biogaz.

En France, et à l'étranger, de nombreux laboratoires d'Etat, la station de l'I.N.R.A. de Villeneuve d'Ascq par exemple, s'occupent de la méthanisation, et pratiquent systématiquement l'isolement et la culture des souches.

Il existe maintenant un assez grand nombre de cultures pures de souches de micro organismes méthanogènes dans les différentes collections internationales.

Ces souches sont dénommées par les sigles : ATCC, NRRL, IBS, etc... Toutefois ces cultures ne sont pas encore utilisées couramment, du moins en Europe.

Il faut noter qu'aux Etats Unis, une firme industrielle commerciale déjà un lyophilisat de bactéries.

1-6 Technologie - Exemples de réalisation

Pour terminer cette première partie, nous allons présenter ici 3 exemples de réalisations ayant fait l'objet d'une expérimentation large, puis d'une utilisation courante.

La première fonctionne en discontinu, tandis que les deux autres travaillent en mode continu.

1-6-1 Installation à chargement discontinu.

Voir schéma 3

Cette installation fonctionne suivant le procédé Ducelier et Isman.

Lors du chargement de la cuve, il est très important de bien tasser le substrat. L'ensemencement bactérien est réalisé par le système du pied de cuve. On ferme le digesteur de manière hermétique grâce au joint hydraulique, contenant de l'eau ou du purin. La production de biozaz s'observe en contrôlant le déplacement de la cloche dans le gazomètre.

Il n'y a pas vraiment de système de chauffage, cependant les auteurs conseillent en zone froide, d'entourer la cuve d'un manchon, d'environ 0,5m d'épaisseur, de fumier.

Les cuves sont construites en ciment, le couvercle et la cloche en tôle ; pour éviter les phénomènes de corrosion, le tout est recouvert de tondron. La cloche pourrait être montée directement sur le digesteur, mais, comme nous l'avons dit, une production continue de biozaz implique la mise en service alternative de deux cuves au moins. Celles-ci sont donc couplées au même gazomètre.

Il faut noter que ce digesteur fonctionne depuis 25 ans sans aucun frais d'entretien.

1-6-2 Installation Indienne à chargement continu.

Voir schéma 4.

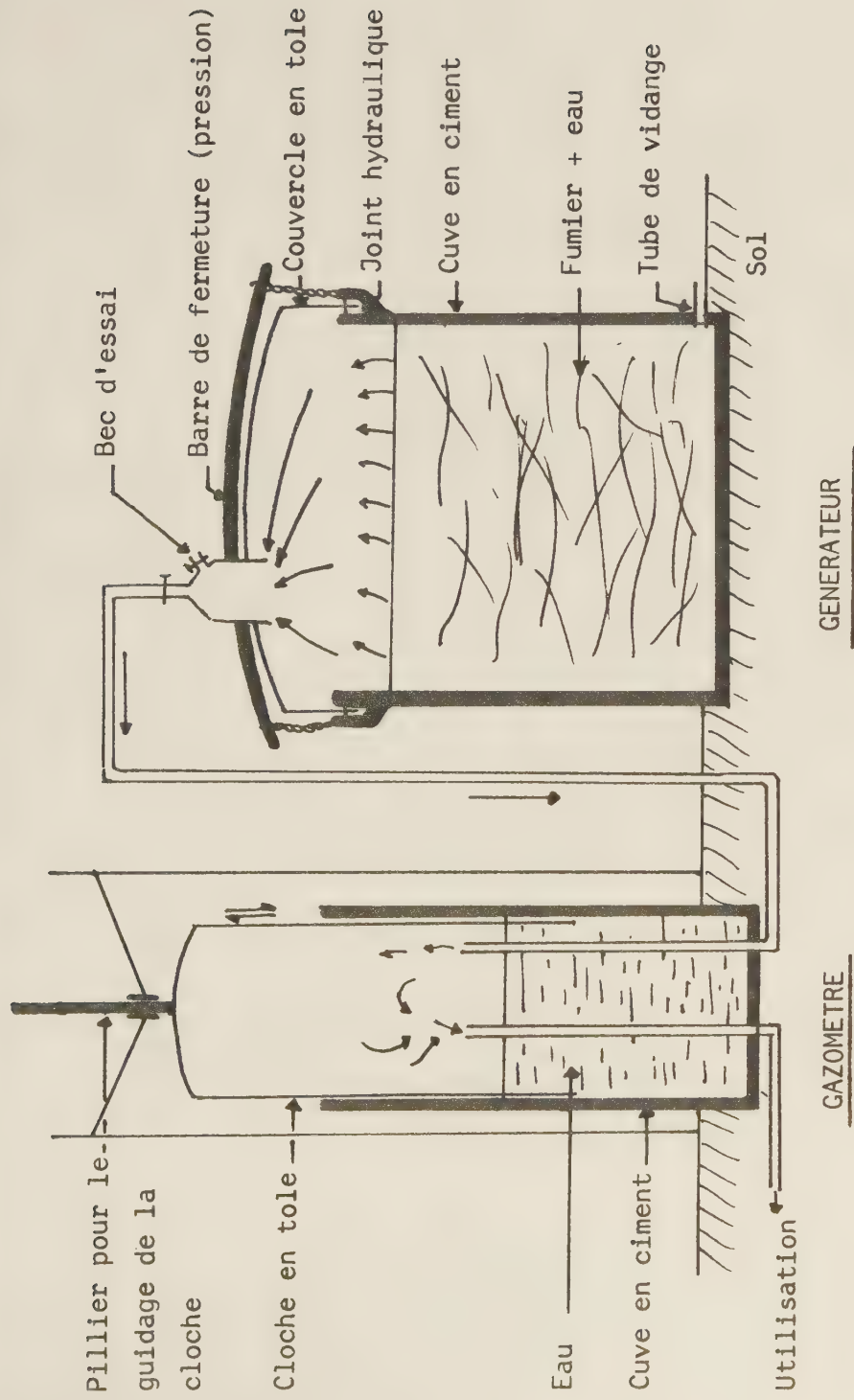


Schéma 3: Installation discontinue (d'après Drevon et Isman, 1977)

Il s'agit là d'une installation correspondant à un type utilisé en Inde.

Les matières fécales sont délayées dans le réservoir I dans de l'eau éventuellement préchauffée.

Un tuyau conduit à l'approvisionnement journalier du substrat, du réservoir I à la première chambre du digesteur. Une quantité égale est alors rejetée de la deuxième chambre jusque dans la cuve de décantation III. Le volume total du générateur est ici de 7,5 m³. Pour que l'évacuation puisse se faire sans aide mécanique, il importe que le sommet du tuyau d'évacuation soit à un niveau inférieur du réservoir et au plus égal au niveau du substrat dans le générateur. Le réservoir de mélange peut-être surélevé afin d'augmenter la puissance d'évacuation.

Avec ce système de deux chambres de fermentation, la matière organique est décomposée au cours du déplacement continu dans le digesteur.

La formation d'une croûte à la surface du substrat est évitée par quelques rotations quotidiennes de la cloche sur laquelle sont montées des équerres métalliques.

Le générateur est construit en béton, ses parois et cloisons sont renforcées de tiges et anneaux métalliques de 1 cm de diamètre. On enduit les parois internes de ciment afin d'éviter les fuites. Le gazomètre est constitué d'un cylindre d'acier. Les parois des isolants et des réservoirs sont en briques. Pour limiter les problèmes de corrosion, il faut enduire la cloche et la paroi interne du générateur de goudron.

1-6-3 Installation Suisse à chargement continu.

Voir schéma 5.

Cette installation fonctionne avec le lisier de porcs d'une porcherie d'enfaisement du canton de Vaud (Suisse). Les matières fécales sont délayées par les eaux de lavage, et ne nécessitent donc pas d'autre apport d'eau.

servoir de
lange, I

Générateur, II

Cuve de déchar-
ge, III

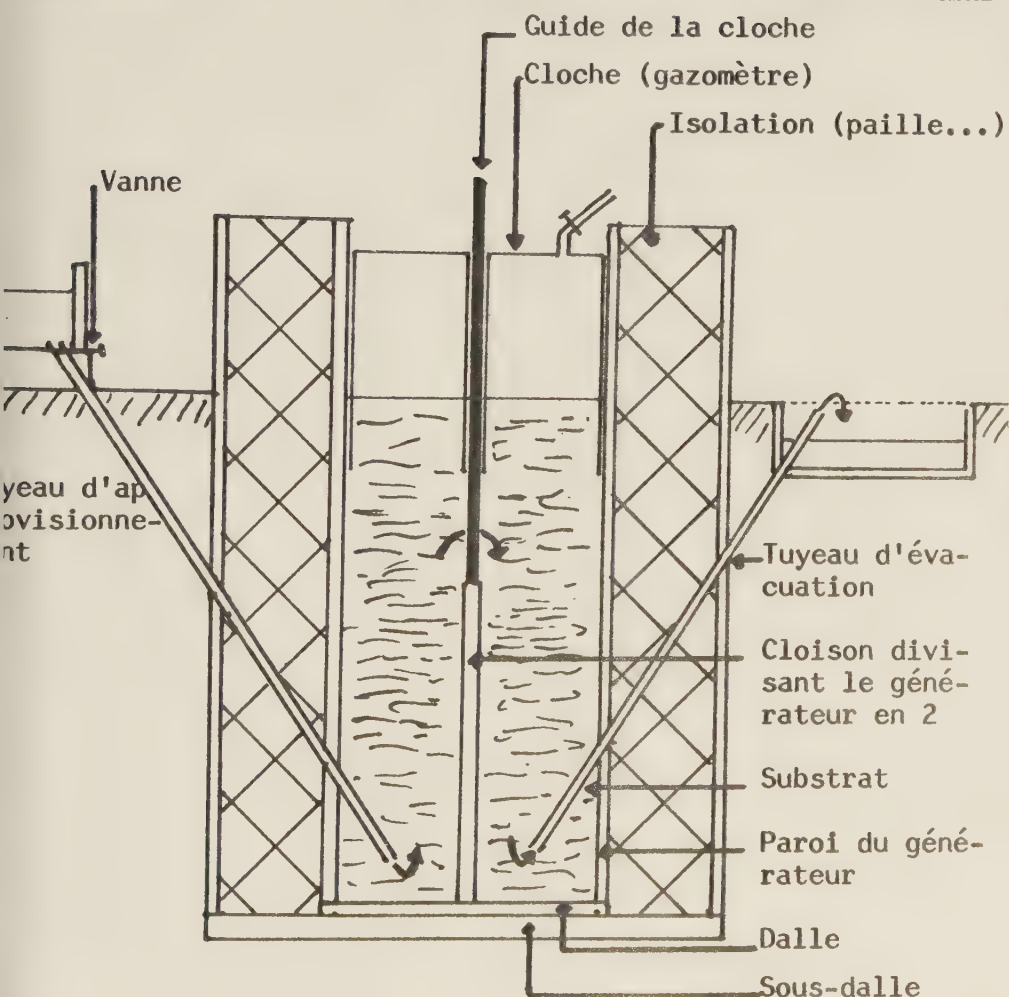


Schéma 4: Installation Indienne, fonctionnant en continu
(Drevon et Isman 1977)

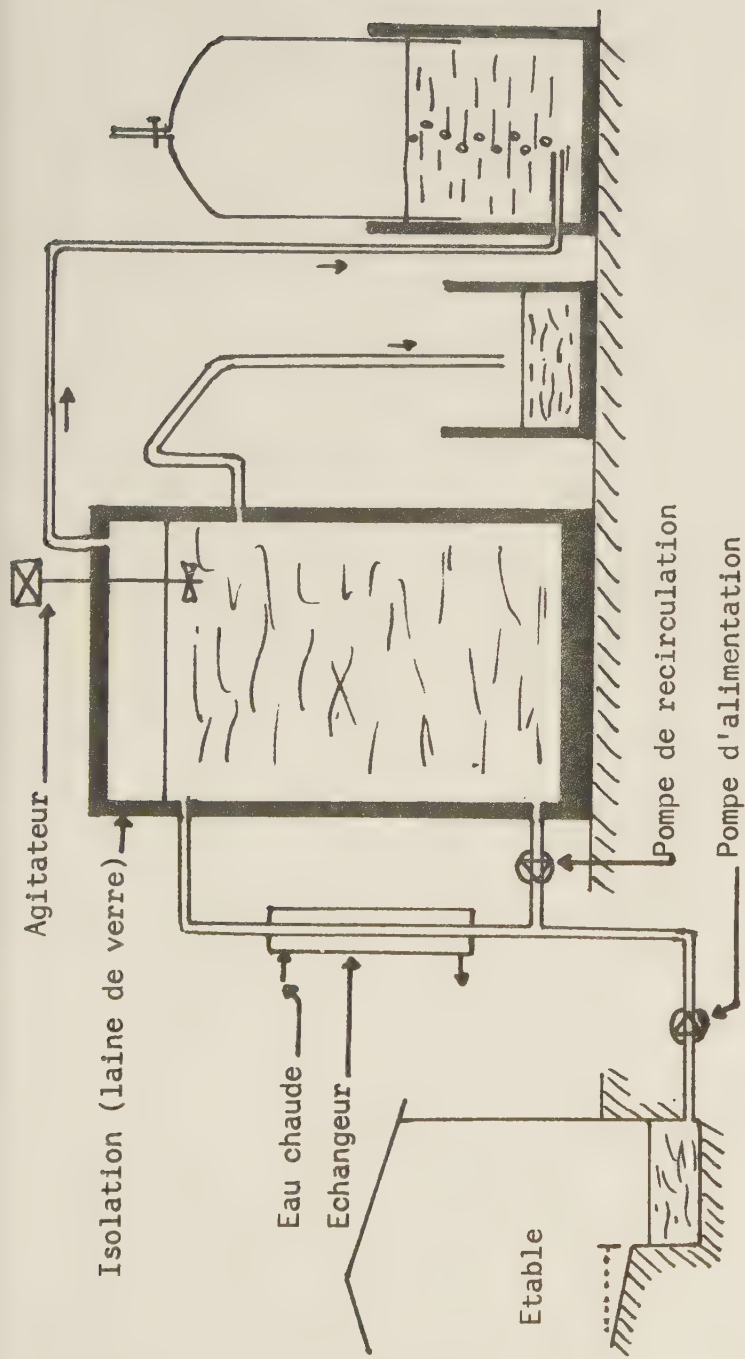
Elles sont récoltées dans une fosse se trouvant sous les aires d'élevage. De là, une pompe à impulsion périodique et automatique les envoie dans le digesteur. Un échangeur de chaleur a été monté sur les canalisations de manière à préchauffer la matière entrante. Lorsque le niveau du substrat dans la cuve dépasse une certaine limite, le siphon des canalisations d'évacuation est amorcé et la matière fermentée est conduite dans un réservoir de stockage.

Un gazomètre externe est couplé à cette cuve.

L'agitation se fait ici de deux façons différentes : un agitateur mécanique d'une part et la recirculation de la matière d'autre part.

Le générateur est construit en béton armé, isolé d'une couche de 10 cm de laine de verre.

Le gazomètre est encore une fois constitué d'une cloche métallique, et les parois internes du générateur et du gazomètre sont recouvertes de goudron.



Fosse

Générateur

Effluents

Gazomètre

5: Installation Suisse, fonctionnant en continu.

2eme PARTIE : INTERETS DE LA FERMENTATION METHANIQUE EN ELEVAGE

La fermentation méthanique procure à l'éleveur qui installe un digesteur chez lui, des avantages certains, aux plans strictement vétérinaires, par l'intermédiaire de l'utilisation du fumier décomposé. Celui-ci peut-être notamment utilisé en tant que fertilisant des champs ou en tant que complément alimentaire. Ce recyclage de la matière fermentée comporte peu de dangers du point de vue sanitaire, car beaucoup de germes et formes parasitaires libres se trouvant dans les déjections animales sont détruites lors du passage dans le digesteur. La fermentation méthanique permet donc une prophylaxie de nombreuses maladies infectieuses et parasitaires.

Mais, comme nous l'avons dit, en ces périodes d'insécurité énergétique, c'est bien entendu la production de biogaz qui tentera le plus d'éleveur, même si, à long terme, il s'apercevra que le gaz de fumier ne constitue que la moitié, au plus, des économies que le digesteur lui fera faire.

2-1 Interet énergétique

2-1-1 Consomation énergétique de l'agriculture en France

En 1978, le groupe Bellevue estimait la consommation globale française de l'année 1975 à 143 MT ep (Millions de tonnes équivalent pétrole).

Il faut noter que 1975 était une année particulièrement économe.

En effet en 1977 la consommation française était passée à 156,9 MTep.

Pour l'année 1975, la consommation énergétique en agriculture était de 5,9 MT ep.

Celles-ci se répartissaient en :

+ Chaleur basse température	1,6 MTep
+ Force motrice mobile	3,7 MTep
+ Force motrice fixe	0,3 MTep
+ Electricité	<u>0,3 MTep</u>
Total	5,9 MTep

Ces chiffres représentent la consommation actuelle mais ne rendent pas compte de son évolution.

Le VIIème plan prévoit de distribuer en 1985 un total d'énergie de 207,5 MTep, et 300 MTep en 2000. Toutefois, ces prévisions sont controversées par plusieurs auteurs qui pensent qu'à long terme nous nous dirigeons vers une stabilisation de la consommation énergétique "dans le cadre d'un équilibre post industriel stable valorisant l'autosubsistance" (Chartier, rapport V.E.D.A. 1979). Le projet Alter, notamment, annonce des consommations globales de 168 MTep en 1985 et 166 MTep en 2000.

Tous les auteurs s'accordent à penser que "l'agriculture pourra trouver dans ses sous-produits une part non négligeable de son approvisionnement énergétique futur". (Sourie, rapport V.E.D.A 1979).

Actuellement, la consommation de combustibles non commerciaux; charbon de bois, bouses de vaches séchées,... est relativement faible : en pourcentage de la consommation énergé-

tique totale, nous avons :

+ Monde	6
+ Europe occidentale	0,7
+ Amérique Latine	20
+ Afrique	60
+ Inde	56
+ Inde rurale	93

(1979).

La fermentation méthanique, déjà largement utilisée en Inde rurale, devrait nous permettre d'augmenter, en Europe, et en France en particulier, cette proportion.

Dans le bilan énergétique de l'agriculture, n'entrait pas en ligne de compte l'énorme consommation énergétique nécessaire à la production d'engrais synthétiques utilisés en agriculture. Or, l'utilisation du fumier décomposé en tant que fertilisant des terres devrait permettre de limiter de manière importante l'emploi des engrais synthétiques.

2-1-2 La production de biogaz

Notons tout d'abord le remarquable rendement énergétique de la fermentation méthanique, c'est-à-dire la proportion de l'énergie brute que l'on retrouve dans le biogaz sous forme de combustible par rapport à la perte d'énergie brute du substrat : d'après Verrier (1978), ce rendement est de l'ordre de 90 %, ce qui est excellent.

Malheureusement, il est très difficile de donner une idée des rendements en biogaz des différents types d'installations. En effet, la pluralité des substrats possibles de la fermentation méthanique, et des conditions de fermentation donne lieu à d'énormes différences de rendement et il est impossible d'en citer un qui ne soit pas un cas particulier.

Néanmoins, nous allons ici mentionner tout d'abord les productions de biogaz enregistrées dans les cas des installations décrites au paragraphe 1-6, ensuite nous verrons quelles sont les possibilités d'augmentation de ces productions, ainsi que les rendements

maximums annoncés jusqu'à présent.

2-1-2-1 Productions des installations décrites en 1-6

+ 1er exemple, fonctionnant sur le procédé Ducelier et

Isman

La production maximale annoncée est de 2,46 m³ de biogaz par jour à la température optimale de 37°C, pour une tonne de fumier. Toutefois, les auteurs, Drevon et Isman, ajoutent qu'en conditions moyennes, une tonne de fumier donne 1m³ de biogaz par jour, donc environ 60 m³ de biogaz par cycle de fermentation, qu'ils font durer deux mois approximativement. Cette différence entre la production optimale et la production réelle est principalement due au fait que la température de la biomasse n'atteint presque jamais l'optimum de 37°C.

Si l'on compte qu'une U.G.B. (unité gros bovin, 500kg) donne environ 25 kg de bouses fraîches par jour, compte tenu du tassement du fumier dans la cuve, il faut prévoir environ 50 U.G.B. pour fournir une tonne de fumier dans la cuve.

La production annoncée, ramenée à 1'U.G.B. serait donc de l'ordre de 1,20m³ de biogaz U.G.B. et par jour.

+2eme exemple, installation fonctionnant en Inde.

La taille du digesteur proposé convient pour un approvisionnement quotidien en fèces fraîches de 5 vaches, soit environ 125kg.

Le taux de matières sèches du substrat doit être compris entre 7 et 9 %. Les fèces fraîches contenant environ 18 à 20 % de matières sèches doivent donc être délayées dans le réservoir I, dans un poids d'eau égal à 1,25 fois 125kg, soit 155kg. L'apport quotidien sera donc de 280 à 300kg.

Le temps de digestion voulu est d'environ 25 jours, pour une température approximative de 35°C.

La production de biogaz annoncée est de 2,5m³ de biogaz par jour, ce qui ramené à 1'U.G.B. correspond à 0,5m³ par U.G.B. et par jour. Cette production, relativement faible, s'explique notamment par le taux de matières sèches très bas du substrat.

+ 3eme exemple, concernant une installation fonctionnant dans une exploitation de 1200 porcs à l'engrais, qui fournissent quotidiennement une quinzaine de m³ de lisier, contenant environ 5 % de matières sèches.

La température de fonctionnement du digesteur est de 35°.

Les rendements annoncés sont de 260m³ de biogaz par jour, contenant 65 % de méthane, ce qui est un taux très intéressant.

Si l'on compare les 1200 porcs de 80 kg environ à 180 U.G.B., cela donne une production de 1,35m³ de biogaz par jour et par U.G.B.

Il faut encore noter que les rendements cités pour exemples décrits ne sont que des moyennes des productions enregistrées. Celles-ci, en effet, ont pu varier parfois du simple au double et ceci, en raison des variations de l'alimentation des animaux des variations de présentation physique du substrat... Il nous est par conséquent impossible de dire à l'avance que pour tel type de digesteur, fonctionnant dans telles conditions nous aurons une production de tant de m³ de biogaz.

2-1-2-2 Meilleures productions annoncées. Estimation
de la quantité de biogaz récupérable des
déjections animales.

Les rendements les plus forts publiés jusqu'à ce jour, sont ceux obtenus en laboratoire par Marchaim (1973) : travaillant en continu et en thermophilie, il obtenait des productions de 8m³ de biogaz par jour et par m³ de réacteur, ceci avec des substrats contenant jusqu'à 18 % de matières sèches. Pour alimenter 1m³ de réacteur avec un temps de rétention de 6 jours il faut 3 à 4 U.G.B. ceci donne donc une production de biogaz de 2 à 2,66m³ par jour et par U.G.B.

Ce sont, bien entendu, des résultats obtenus en laboratoire, mais les Israéliens sont persuadés qu'avec une bonne maîtrise de la technique, ils arriveront à de telles productions à une échelle "industrielle".

Toutefois, actuellement, les prévisions sont plus modestes. Cependant elles n'en sont pas moins dénuées d'intérêt. Zelter (1974) estime la quantité de déjections animales récoltables en France pendant la période de stabulation des bovins, ovins, porcins et volailles, à 160 millions de tonnes. Ceci permet à Verrier (1978) d'affirmer que si l'on utilisait ces matières comme substrat d'une fermentation méthanique en discontinu, fournissant 25 m³ de biogaz par tonne de fumier et par cycle, ce qui est une estimation très faible, l'on pourrait obtenir 4.10⁺⁹ m³ de biogaz par an, ce qui correspond à 22 milliards de thermies soit 2,2 Mtep par an. Les productions très faibles utilisées pour ce calcul nous autorisent à penser que les économies d'énergies réalisables par la fermentation méthanique seraient supérieures à cette estimation. Notons d'ailleurs que Marchaim (1978) compte, pour les mêmes calculs, une production minimale de 50 m³ de biogaz par tonne de fumier.

L'examen des productions actuelles et des estimations réalisées par les différents auteurs justifient les prévisions de l'O. C. D. E. (Organisation de Coopération et de Développement Economique) : la bioénergie fournirait en 2 000, 2 % des besoins énergétiques mondiaux (Verrier 1978).

2-1-3 Utilisation du biogaz

Rappelons d'abord la composition du gaz obtenu :

CH ₄	54 à 70 %
CO ₂	27 à 45 %
N ₂	0,6 à 3 %
H ₂	1 à 10 %
CO	0,1 %
O ₂	0,1 %
H ₂ S	Traces .

D'après Ecotope Group
and Parametrix inc.
(1975).

Le méthane, principal composant du biogaz, est comme

chacun le sait, un gaz très combustible. Son pouvoir calorifique est de 9,52 thermies par m³, tandis que celui du biogaz est, suivant sa composition exacte, de 5 à 6 thermies par m³. Dans le tableau 6 nous pouvons voir les pouvoirs calorifiques des principales sources d'énergie classiques, et ainsi les comparer à ceux du biogaz et du méthane.

Energie	Pouvoir calorifique
Gaz de Laco	9,7 thermies/m ³
Gaz de ville	4,5 thermies/m ³
Fuel oil domestique	9,0 thermies/l
Charbon	6,7 thermies/kg
Pétrole	11,3 thermies/kg
Biogaz	5 à 6 thermies/m ³
Méthane	9,5 thermies/m ³

Tableau 6 : Pouvoir calorifique de diverses sources d'énergie (Verrier 1978)

Avant de décrire les différentes façons d'utiliser le biogaz, il est intéressant de donner les équivalences entre les nombreuses unités d'énergie employées actuellement.

Unités	JJ	KWh	Th
Millions de joules	1	0,2778	0,239
Kilo-watt heures	3,6	1	0,86
Thermie	4,18	1,163	1
Tonne équivalent pétrole	$4,18 \cdot 10^4$	$1,16 \cdot 10^4$	$1,00 \cdot 10^4$
Tonne équivalent charbon	$2,79 \cdot 10^4$	$7,75 \cdot 10^3$	$6,67 \cdot 10^3$
British thermal unit	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$

Tableau 7 : Equivalences des unités d'énergie

Le biogaz peut servir en l'état, brûlé directement dans une chaudière ou dans une cuisinière.

Cette possibilité est spécialement intéressante dans le cas de chauffage des serres, car la quantité importante de gaz carbonique qui se dégagera pendant cette combustion, venant à la fois de l'oxydation du méthane et de la libération du gaz carbonique du biogaz, sera utilisée par photosynthèse pour la croissance des végétaux. Mais un meilleur rendement thermique nécessitera une épuration du biogaz. Celle-ci peut-être réalisée très simplement par un lavage du gaz brut : on fait circuler le biogaz dans une colonne dans laquelle passe en sens opposé un courant d'eau. Cette technique très simple assure l'élimination du gaz carbonique et de l'hydrogène sulfuré, et permet donc de diminuer de manière intéressante le volume de la fraction utile du biogaz.

L'élimination de l'hydrogène sulfuré permet en outre d'éviter les problèmes corrosifs dus à sa présence.

Le méthane presque pur obtenu, peut ensuite servir aux mêmes usages que le gaz de Lacq.

Un simple réglage de carburation permet d'utiliser le biogaz, ou le méthane, comme combustible pour les moteurs "à essence". Un constructeur automobile Italien construit d'ailleurs une voiture équipée d'origine de deux systèmes de carburation, l'un pour le gaz et l'autre pour l'essence.

L'emploi du méthane comme carburant des moteurs Diesels, peut se faire de deux manières différentes : soit en réalisant un mélange méthane-gazole à 90 % - 10 %, solution retenue pour les moteurs de la station d'épuration d'Achères, soit en transformant légèrement le moteur : création d'un système d'allumage et réduction du taux de compression.

Très souvent le biogaz fait l'objet d'une utilisation continue : brûlage dans une chaudière, combustion dans un groupe électrogène,..., l'installation ne nécessitera pas de système de stockage. Il suffit que la cuve de fermentation puisse supporter une pression de quelques atmosphères et soit équipée d'une soupape de sécurité. Une deuxième solution possible consiste en l'adjonction

au système d'un gazomètre souple.

Mais parfois le stockage d'une quantité importante de gaz devient nécessaire. A cet égard, le lavage du gaz est intéressant, puisqu'il ne laissant passer que le méthane du mélange, le volume à stocker diminue environ d'un tiers.

La possibilité du gazomètre souple est toujours envisageable, mais dans les cas de grands volumes, la seule solution est la compression du méthane et sa mise en bouteilles. Notons que certains auteurs sont contre cette possibilité : la compression du méthane est dangereuse et il n'est pas prudent de l'envisager à la ferme. (Broeze, rapport V.R.D.A. 1973). Pourtant la compression n'est qu'un problème de matériel et son utilisation à grande échelle est liée à la mise sur le marché de compresseurs sûrs et faciles d'emploi. Le même auteur envisage la possibilité de liquéfier le gaz ce qui, par contre, pose des problèmes d'ordre technologique. En tout état de cause, il existe déjà des installations comportant des dispositifs de compression et c'est, de plus, la seule solution envisageable si l'on veut utiliser le méthane pour alimenter des moteurs mobiles, qui consomment, rappelons-le environ 60 % de l'énergie requise pour l'agriculture.

2-2 Diminution des nuisances et de la pollution

L'augmentation du nombre d'animaux dans les élevages dits industriels, et la concentration de ceux-ci dans certaines régions posent d'importants problèmes de pollution atmosphérique et aquatique, pollution de type organique bien entendu.

La pollution atmosphérique engendrée par les élevages est source de nuisances pour les voisins des exploitations en cause. Elle est due, d'une part, au stockage et à l'utilisation des déjections animales, épandage en particulier, et, d'autre part, aux animaux et aux bâtiments d'élevage eux-mêmes. Ce type particulier de pollution est cause d'attaques et de poursuites judiciaires dont la fréquence augmente avec l'implantation des élevages en zones de concentration, donc fortement peuplées.

Quant à la pollution aquatique, elle peut-être due :

+ à des polluants organiques, qui, pour leur dégradation par oxydation, consomment de l'oxygène. Lorsqu'ils sont en quantité trop importante, la capacité d'auto-épuration du milieu aquatique est dépassée par manque d'oxygène et, de toutes façons, quelle que soit la quantité déversée, les eaux s'enrichissent en matières organiques, ce qui provoque l'apparition ou le développement excessif d'organismes indésirables qui entrent en compétition avec les espèces dites nobles.

+ à des polluants minéraux non toxiques, mais qui provoquent un développement important des algues et du plancton aboutissant à une eutrophisation rapide des cours d'eau.

+ à des polluants microbiens, spécialement en cas d'épidémies, conduisant à une contamination du milieu récepteur.

Tous ces problèmes ont amené le législateur à considérer certains élevages, les porcheries notamment, comme des "installations classées pour la protection de l'environnement", installations soumises à déclaration dont l'implantation est sujette à des lois et à des restrictions d'emplacement. Des textes de même nature visent l'utilisation des déjections de ces élevages.

La fermentation méthanique peut jouer un rôle dans la protection de l'environnement, et ceci aux deux niveaux cités plus haut : lutte contre la pollution aquatique, et lutte contre la pollution atmosphérique.

Dans le cadre de la protection du milieu aquatique, nous avons dit que la dégradation des matières organiques dans l'eau se faisait par oxydation. Celle-ci consomme une grande quantité d'oxygène.

Des paramètres ont été définis pour mesurer cette quantité d'oxygène :

D.B.O.₅ : demande biologique en oxygène pendant 5 jours ;
C'est la mesure de la quantité d'oxygène consommée par les micro-organismes pour dégrader les matières organiques rejetées dans l'eau, dans des conditions déterminées et pendant 5 jours.

+ D.C.O.₅ : demande chimique en oxygène.

Or, la fermentation méthanique diminue la D.C.O.
du substrat de 60 % et la D.B.O.₅ de 70 à 85 %, ce qui correspond donc à une dépollution qui est expliquée par la dégradation de la matière organique ayant lieu lors du processus de digestion méthanique.

Les limites légales imposées par l'arrêté préfectoral du Rhône, n° 12-79 du 8 janvier 1979, pour rejeter des lisiers épurés dans les eaux courantes, sont une D.C.O. de 35 g par jour et par porc. Si nous estimons en moyenne à 100 g par jour et par porc la D.C.O. du lisier frais, la réduction annoncée par Verrier devrait permettre de descendre aux alentours de ces limites légales.

Au plan de la lutte contre la pollution atmosphérique, le rôle de la fermentation, s'il n'est pas quantifiable, n'en est pas moins reconnu par tous les auteurs : Verrier (1978) disait que la désodorisation des lisiers de porcs est efficace ; en Israël, Marchaim (1978) annonce que ses expériences ont montré que le résidu de fermentation méthanique n'a presque pas d'odeurs. Nous avons nous-mêmes eu l'occasion de sentir du fumier de bovins décomposé par fermentation méthanique thermophile pendant 6 jours ; l'odeur était très faible et difficilement attribuable à des déjections animales.

Ceci est très intéressant au plan de l'environnement ainsi qu'au plan judiciaire. En effet, article 12 du même arrêté préfectoral du Rhône n° 12-79 du 8 janvier 1979 stipule que les "émissions d'odeurs provenant de l'épandage (de lisiers de porcherie) ne devront pas constituer une source de nuisances pour le voisinage. Les odeurs au niveau de l'épandage seront combattues en utilisant du lisier désodorisé. L'épandage sans enfouissement ou qui ne met pas en oeuvre un lisier désodorisé est interdit à moins de 200m de tout logement occupé par des tiers ou de tout local à usage professionnel".

L'installation d'un digesteur dans une porcherie pourrait

permettre d'éviter l'achat d'un dispositif de désodorisation. A titre d'exemple, la désodorisation par stabilisation thermophile revient environ à 10 à 12 francs par porcs (estimation de l'Institut Technique du Porc, en 1974).

2-3 Utilisation du résidu de fermentation comme fertilisant

Actuellement, la principale utilisation du fumier frais est l'épandage. Le fumier est en effet une source de choix pour l'humus.

L'humus est une matière organique de néoformation résultant à la fois de réactions de décomposition de la matière organique du sol, et de synthèse. Seules les matières organiques végétales peuvent, par décomposition microbienne, donner de l'humus.

La matière végétale apportée au sol se répartit en deux fractions : la plus grande (60 à 70 %) se minéralise rapidement. L'autre fraction s'humifie en donnant une matière organique plus résistante aux actions bactériennes, c'est l'humus stable.

Les besoins du sol varient avec sa texture et sa température et il convient de ne jamais descendre au dessous d'un niveau critique, car dans ce cas, il est très difficile de remonter le taux de matières humiques. Or, la culture de la terre correspond à une perte d'humus, et celle-ci ne peut-être compensée que par l'apport d'une quantité de matière organique quatre fois plus importante, d'où l'intérêt du fumier.

En dehors de leur rôle générateur d'humus, les engrais organiques restituent au sol des matières minérales. Le fumier est donc un élément capital pour l'exploitant qui associe l'agriculture à l'élevage.

La fermentation méthanique, dont un substrat peut-être le fumier, ne supprime pas le rôle fertilisant des déjections animales. Sur ce point, tous les auteurs sont d'accord : "la valeur fertilisante du substrat est intégralement retrouvée dans l'effluent" (Verrier 1973). Certains sont même plus optimistes : " La fermentation méthanique

conserve, voire améliore, la matière organique du substrat (Sourie, rapport V.E.D.A 1979).

Parmi les méthodes de préparation du fumier, Duthil (1973) cite la fermentation méthanique sans y ajouter d'inconvénients quant à la valeur de l'amendement humique retiré de la cuve.

Pourtant, d'après la définition même d'un amendement et de l'humus (provient de la décomposition et de la fermentation des matières organiques), on pourrait penser que la valeur du fumier décomposé en tant qu'amendement humique est moindre que celle du fumier frais. Les fermentations conduisant à l'humification doivent en effet avoir lieu sur le terrain pour être utiles au sol. Or, le résidu de la dipeston méthanique est déjà dégradé de manière importante, Bien entendu, après la sortie de la cuve, il reste encore de la matière organique qui pourra donner lieu à des fermentations aérobies, mais l'on peut dire que le processus de la fermentation méthanique diminue de beaucoup (puisque la D.C.O. est réduite de 60 %) la valeur humique du substrat.

Cependant, le deuxième intérêt du fumier est son effet fertilisant. La fertilisation est définie comme étant l'apport au sol des éléments nutritifs nécessaires au développement des plantes. A cet effet les principaux minéraux pris en considération sont l'azote, le phosphore et le potassium, exprimés par trois nombres indiquant dans l'ordre la quantité d'unités fertilisantes de N,P,K, contenues dans 100 kg d'engrais, les quantités de N,P,K, sont exprimées en azote, acide phosphorique et potasse.

Si la valeur humique du fumier décomposé semble être diminuée par contre, il n'en est rien pour sa fraction N,P,K, Marchaim (1978) disait que lors de la fermentation méthanique, il n'y a que peu de changements dans le N,P,K et les autres minéraux requis par les plantes ; au contraire, leur disponibilité a pu être haussée.

Isman (1976) annonce même que sa richesse en éléments fertilisants est supérieure. Une partie de la matière organique étant détruite lors de la digestion méthanique, la teneur proportionnellement

à la matière sèche des éléments restant s'en trouve automatiquement augmentée.

De plus ces différents auteurs pensent que ces éléments se trouvent sous une forme plus assimilable par le sol et plus disponible pour les plantes. "Le fumier décomposé retiré des cuves en fin de fermentation se trouve, par rapport à un fumier préparé à l'air libre par la méthode classique, dans un état de dégradation moins prononcée, plus favorable à son évolution ultérieure dans le sol" ; (Isman 1976)

Il faut de plus noter que très souvent le fumier préparé classiquement et stocké sans précautions spéciales perd de ses éléments nutritifs par lessivage, dénitrification et dégagements gazeux. Duthil (1973) estime que ces pertes atteignent fréquemment la moitié du total initial de ses éléments nutritifs.

Enfin, la présentation du résidu de fermentation sous forme d'une boue liquide, facilite parfois l'épandage. C'est notamment le cas dans les serres, où les horticulteurs n'utilisent plus que des engrais liquides, et sur les pâturages de montagne. De plus la présentation liquide assure une pénétration plus rapide des composants nutritifs et évite ainsi des pertes supplémentaires par dégagement gazeux notamment.

Le recyclage du résidu de la fermentation méthanique par épandage sur les cultures, permet aussi une réduction de la pollution des nappes phréatiques par l'azote, car ses formes organiques sont plus facilement retenues par le sol.

Un dernier intérêt de la fermentation méthanique au plan de la fertilisation des sols, est l'effet de pasteurisation qui se produit dans le digesteur. Ceci est très important, spécialement pour les cultures de serres qui nécessitent d'importantes quantités d'engrais. Actuellement, les cultivateurs travaillant en serres ont renoncé à l'utilisation du fumier en raison des nombreuses maladies qu'il véhiculait. (Marchaim 1978).

tous ces avantages font que le G.I.D.A. (Groupement inter-Institut pour l'utilisation des Dejections Animales)

a évalué la valeur économique de l'amendement obtenu comme sensiblement équivalente à celle du biogaz.

2-4 utilisation du résidu de fermentation dans un but alimentaire

Nous avons vu que les déjections animales étaient traditionnellement utilisées comme fertilisant des terres, ce qui en est un excellent usage.

Toutefois dans certains cas de grands élevages concentrés, cette solution est parfois difficilement réalisable, soit matériellement soit économiquement, en raison des grandes étendues de terres nécessaires pour absorber les importantes quantités de déchets venant de ces élevages.

Le recyclage des déjections en alimentation a fait alors l'objet de nombreuses recherches.

La coprophagie est une attitude normale chez beaucoup d'espèces sauvages et domestiques et il était normal d'espérer tirer profit de cette tendance.

Les résultats encourageants obtenus jusqu'à présent font que les mêmes expérimentations sont reprises avec comme matière première cette fois-ci le résidu de fermentation.

Nous relaterons ici les résultats de deux séries de recherches, portant l'une sur la fertilisation d'étangs poissonniers, l'autre sur l'alimentation du bétail, à partir de déjections fermentées.

2-4-1 Fertilisation des viviers

Les expériences décrites ici ont été réalisées sur des étangs, c'est-à-dire des viviers à eau stagnante, dans laquelle le résidu de fermentation ne sera pas directement l'aliment des poissons en présence (Carpes, Tilapias...), mais ceux-ci consomment le phyto et le zooplancton, ainsi que les colonies bactériennes du milieu, qui eux cultiveront grâce aux déjections fermentées. Il est par conséquent important de noter que ce n'est pas tant la quantité de protéines en tant que telles qui va

favoriser la croissance du plancton, mais plutôt la quantité des composants élémentaires de ces protéines ; ces composants seront réutilisés en tant que matériaux de base pour l'élaboration des protéines planctoniques. La qualité des déjections fermentées en tant que fertilisant d'étangs ne se mesurera pas d'après son taux de protéines, mais d'après sa richesse en azote, phosphore... Par conséquent ce qui a été dit à ce sujet dans le paragraphe sur la fertilisation des sols, s'applique également ici.

La première étape de ces recherches entreprises par Schroeder (1976) avec des bouses de vaches fermentées, consistait en l'observation du devenir du résidu de fermentation mis dans l'eau. Il est en effet important de connaître la fraction des bouses fermentées qui resterait en suspension dans l'eau pendant un temps donné. Plus cette fraction est importante, plus la dispersion de la matière sera grande et, par conséquent, la surface de culture des bactéries et du plancton, conditionnant leur taux de croissance.

Dans des conditions expérimentales définies (mélange de 25 ml de bouses fermentées avec 100 ml d'eau distillée et pesage des fractions décantées et en suspension au bout de 90 mn), les résultats obtenus sont les suivants :

Bouses fraîches	18 à 21 % des solides en susp.
Bouses fermentées à 35°C	21 à 27 % des solides en susp.
Bouses fermentées à 55°C	37 à 42 % des solides en susp.

Ces valeurs obtenues sont différentes suivant l'origine des bouses, mais les écarts entre elles restent approximativement constants.

La fermentation augmente donc la quantité de matières sèches qui reste en suspension, ceci est spécialement vrai pour la digestion thermophile. La faible différence entre les résultats obtenus à partir des bouses fraîches et des bouses fermentées en mésophilie vient de la similitude des phénomènes se passant dans le rumen d'une vache et dans ce type de réacteur.

Ensuite Schroeder a essayé de déterminer l'effet de l'adjonction des bouses sur les productions de poisson et leurs indices de consommation.

Cet effet n'est pas net et très difficile à apprécier objectivement, les différences dues au climat, aux variations du fond, à l'eau elle-même..., entre deux étangs ou entre deux années pour le même étang, pouvant être énormes.

Ces essais ont été réalisés sur des étangs alimentés soit classiquement, soit avec 50 % de bouses fermentées et 50 % d'aliment. Les résultats obtenus semblent prouver que dans les deux cas la production totale de poissons à l'hectare est approximativement la même, alors que l'indice de consommation est de l'ordre de 30 à 40 % plus bas dans le deuxième cas.

Malgré la difficulté d'interprétation de ces chiffres, on peut dire que l'utilisation de déjections fermentées pour la fertilisation d'étangs poissonniers est réellement intéressante. Toutefois une utilisation courante nécessitera des études plus complètes pour obtenir des résultats objectifs et quantifiables.

Quant à la santé des poissons, le D^r Chanina Barash, directeur de la station de recherches piscicoles de Dor (Israël) pense qu'elle n'est pas affectée par l'utilisation du résidu de fermentation. Tout au plus a-t-il remarqué que les poissons, les carpes surtout, alimentées de cette manière, étaient moins gras que ceux nourris avec des aliments classiques. Le taux de matières grasses passe de 20 % à 7 %. (Communication personnelle).

En fin, l'oxygénation de l'eau n'est pas spécialement affectée par cet apport de matière organique dont la D.B.O.₅ est identique à celle des aliments classiques.

2-4-2 Alimentation du bétail.

Après avoir effectué avec succès des recherches sur l'alimentation des ruminants avec des déjections animales, Prior et Hashimoto (1979) entreprirent les mêmes expérimentations avec les effluents de la fermentation méthanique.

La première partie de ces expériences consistait en une analyse comparative des déjections avant et après la dégradation par fermentation. Leur conclusion générale est que la quantité d'éléments nutritifs de l'effluent est le reflet de la composition du substrat utilisé pour la fermentation.

Celle-ci est, nous l'avons vu, étroitement liée à plusieurs facteurs tels que l'alimentation des animaux fournissant le substrat, leur âge... et le mode d'élevage. Un élevage sur terre battue produira des déchets contenant plus de matière minérale qu'un autre, d'animaux de même âge, recevant la même alimentation, sur sol ou béton.

Lors du processus de la fermentation méthanique, les quantités totales d'azote et de minéraux sont les mêmes dans la biomasse entrant dans le digesteur et dans l'effluent. Par contre la forme de l'azote contenu dans ces matières est différente.

La proportion d'azote sous forme d'ammoniac passe de 27 % dans les déjections fraîches à 48 % après fermentation. Ceci avait d'ailleurs déjà été montré à l'étude de la biochimie.

Mais si l'on exprime la teneur en protéines de l'effluent par rapport à la matière sèche, on observe une augmentation de 25 à 32 % environ (considérant que tout l'azote non ammoniacal est sous forme de protéines). La quantité d'acides aminés de la matière sèche est approximativement doublée. Ceci est dû au fait que pendant la fermentation, la teneur en matières sèches de la biomasse diminue environ de 45 à 50 %.

La quantité d'énergie contenue dans la matière sèche est relativement constante, ce qui correspond donc à une diminution de la quantité globale d'énergie, fraction qui a été récupérée dans le biogaz. Les auteurs citent les chiffres de 4661 kcal/g avant la fermentation et 4665 kcal/g après. Cependant, il est certain que l'énergie de l'effluent n'est pas aussi disponible que celle de la matière entrant dans le digesteur. L'effluent est composé en grande partie de matériaux lignifiés peu digestibles.

Quant aux minéraux, leur quantité globale ne change pas, donc leur taux par rapport à la matière sèche augmente. Ceci peut affecter la digestibilité de la ration, spécialement si la teneur en silice est importante, ce qui est souvent le cas, en raison soit d'une contamination des excréments par le sol (élevage sur terre battue) soit de l'alimentation des animaux avec des végétaux

siliceux, pailles par exemple.

Motons que le D^r Tagari, nutritionniste à l'université Hébraïque de Jérusalem, Israël, autopsiant des agneaux qu'il avait alimenté avec du fumier fermenté, a constaté l'existence de résidus de minéraux dans le foie et les reins (communication personnelle). Les effets véritables de ces minéraux restent encore à prouver.

Un gros problème de l'alimentation contenant des déjections fermentées est la faible teneur en matières sèches de ces dernières. L'incorporation de l'effluent tel quel dans une ration pose du fait de son humidité des problèmes de conservation de l'aliment.

Prior et Hashimoto ont alors étudié plusieurs méthodes de séparation des fractions liquides et solides des déjections fermentées : tamisage, décantation, pressurage et centrifugation. Toutes ces techniques ont le même inconvénient : elles ne retiennent qu'une faible part de l'azote total de la biomasse sortant du digesteur. Les matières protéiques de l'effluent sont réparties en deux groupes : les protéines bactériennes et les protéines végétales. Ces dernières sont souvent liées à des matériaux très lignifiés de faible digestibilité, alors que les premières représentent la fraction d'acides aminés la plus digestible. Or toutes les techniques d'isolation de la matière sèche citées plus haut laissent passer ces protéines bactériennes. De plus une grande partie de l'azote ammoniacal est également perdue lors de la mise en oeuvre de ces procédés.

Le problème d'élimination de l'eau est donc toujours posé.

La troisième étape des travaux de Prior et Hashimoto a été de déterminer l'utilisation de ces éléments nutritifs par les animaux.

Leurs essais ont été réalisés avec trois sortes d'effluents : effluent frais, effluent centrifugé (Wet Centrifuged Cake : WCC) et effluent centrifugé et séché (Dried Centrifuged Cake DCC), utilisés comme complément azoté de rations alimentaires.

+ DCC. Les résultats obtenus montrent que les digestibilités de la matière sèche, de la matière organique et de l'azote

tendent à diminuer quand la quantité de DCC augmente dans la ration ; Ceci est vraisemblablement du au caractère lignifié de la matière restant après centrifugation et séchage. Mais le problème principal est celui de la digestibilité des minéraux qui est très faible, et qui affecte celle des autres composants de la ration.

+ WCC. Le remplacement du tourteau de coton d'une ration par le WCC a provoqué une diminution de la quantité totale de matière sèche absorbée, mais n'a pas semblé altérer la digestibilité de la ration.

Le WCC paraît donc plus avantageux que le DCC, d'autant plus que le séchage est aussi la cause de pertes d'azote et une dépense supplémentaire d'énergie. Cependant, les auteurs invoquent le problème du stockage d'un aliment à forte humidité.

+ Effluent tel quel. Par rapport aux lots témoins, ceux ayant reçu dans leur ration une certaine proportion de déjections fermentées ont eu un gain de poids moyen quotidien inférieur de 20 % environ. Les différentes mesures ne fournissent pas d'explication rationnelle à cette diminution de performances, et les auteurs émettent l'idée que la grande quantité de micro-organismes contenus dans l'effluent a pu modifier et déranger la flore rumérale normale. A cet égard il serait intéressant de comparer les effets des fermentations mésophiles et thermophiles.

L'utilisation par les ruminants des déjections fermentées n'est pas parfaitement connue. Pourtant, les caractéristiques de ces matières devraient permettre d'envisager leur emploi en tant que complément azoté de rations très énergétiques mais ne contenant que peu de protéines. En France, actuellement on utilise de plus en plus un aliment de ce type : l'ensilage de maïs, que l'on complète généralement soit avec des tourteaux, soit avec de l'urée, sources de frais supplémentaires.

Quant à l'appétence, Tagari a trouvé que les animaux semblent préférer le résidu de fermentation thermophile à celui de la fermentation mésophile (communication personnelle), ce qui est confirmé par Marchain (1978).

Enfin, au plan de la qualité de la viande et des produits d'origine animale fournis par les animaux alimentés de cette manière, il semble qu'il n'y ait aucune modification des caractéristiques des carcasses et de ces produits.

Si l'utilisation des déjections fermentées pour fertilisées des étangs paraît possible à brève échéance, leur emploi en tant que complément alimentaire du bétail, bien qu'elle semble intéressante, nécessitera encore de longues recherches et expériences permettant notamment de déterminer l'effet de la température de fermentation sur la qualité alimentaire du résidu.

2-5 Intérêt sanitaire de la fermentation méthanique.

L'intérêt sanitaire de la fermentation méthanique porte principalement sur deux points :

+ Tout d'abord, une bonne utilisation d'un digesteur adapté à la taille de l'exploitation et fonctionnant en continu, permet d'améliorer l'hygiène d'un élevage, où trop souvent il n'y a pas d'installations adéquates pour stocker les déjections animales. A la saison chaude, surtout, celles-ci constituent une abondante source de nourriture pour tous les animaux et insectes coprophages, qui, en plus de leur rôle pathogène propre, sont très souvent les vecteurs de nombreuses maladies tant infectieuses que parasitaires.

La récolte quotidienne des déjections et leur entrée dans le digesteur contribue à diminuer le nombre de ces animaux nuisibles dans le périmètre de l'élevage. A la sortie du réacteur, nous avons vu que le substrat décomposé était pratiquement inodore, et Marchaim (1978) ajoutait qu'il n'attirait pratiquement pas les mouches.

Cette limitation de l'attraction des nuisibles est aussi un aspect de la protection de l'environnement.

+ Les conditions spéciales régnant à l'intérieur d'un digesteur où s'effectue la fermentation méthanique, vont permettre,

sinon de stériliser, de détruire un certain nombre de micro-organismes de la matière en trante.

Cet aspect très particulier de la fermentation méthanique autorise sans gros problèmes épidémiologiques la réutilisation du fumier décomposé comme nous l'avons décrite aux paragraphes 2-3 et 2-4. Le recyclage du résidu pourrait être très favorable à l'accomplissement de cycles épidémiologiques du type suivant : les animaux se contamineraient soit directement par consommation du résidu de fermentation, soit indirectement par ingestion d'aliments souillés par ce résidu.



Fig 4 : Rupture des cycles épidémiologiques par la fermentation méthanique.

Or, du fait des conditions physiques de la fermentation méthanique, beaucoup de ces cycles sont rompus entre le stade entrée dans le digesteur et celui de la sortie du fumier décomposé. Nombreux sont les auteurs qui, sans en avoir fait la vérification expérimentale, affirment que beaucoup de micro-organismes meurent pendant la fermentation : "Au cours de ce processus, une proportion importante des germes pathogènes est détruite". (Brouze, V.E.D.A. 1979). Parfois même, les expérimentations tendant à prouver ceci ont été réalisées : "nos expériences ont montré que la composition bactériologique et virologique (du résidu de fermentation) a été modifiée" (Marchaim 1978). Mais cet auteur ne communique pas plus de détails sur ses recherches.

Citons de même une vérification sur le terrain, effectuée par un éleveur Danois propriétaire d'une exploitation de 150 bovins.

Cet éleveur estimait à 100 couronnes par animal et par an le total des coûts d'intervention pour combattre la bronchite vermineuse et des pertes qu'il subissait de par cette parasitose. (une couronne vaut approximativement 0,70 FF). Or, depuis la mise en service de son digesteur, et malgré l'épandage du résidu de fermentation dans ses prairies, il a constaté que son troupeau était indemne de bronchite vermineuse. La somme des bénéfices et des économies réalisées est donc de 15 000 couronnes par an, ce qui d'après lui représente 3,84 fois plus que les économies de carburant réalisées pendant la même période et 3,33 fois plus que les économies d'engrais dues à l'utilisation du résidu de fermentation en tant que fertilisant. Ajoutons que cet éleveur ne passe que un quart d'heure par jour à s'occuper de son digesteur.

(IPAT übersetzt aus dem Dänischen, Maskintjenisten).

Signalons, avant de poursuivre, que si cet aspect prophylactique de la fermentation méthanique est moins connu et moins étudié que la production de biogaz elle-même, il n'en est pas pour autant de découverte récente. En effet, Roubaud, préconisait déjà la fermentation du fumier comme méthode de stérilisation biothermique. Le fumier mis en tas subissait en surface une fermentation aérobie, très exothermique, qui élevait sa température vers 70°C, et en profondeur une fermentation anaérobie de type méthanique, peu exothermique. La température variait donc énormément entre la surface du tas à 70°C environ et le fond, approximativement à 25°C.

Les principaux facteurs qui pourront être défavorables aux micro-organismes dans le réacteur sont l'anaérobiose et la température de la biomasse. L'anaérobiose sera surtout un facteur de létalité pour certaines formes parasitaires libres larvaires, dont l'évolution et la survie impliquent la présence d'oxygène. C'est le cas notamment des larves de premier âge de *Dictyocaulus viviparus*, *Dictyocaulus rufescens*..., agents des bronchites vermineuses des ruminants, qui demandent pour leur évolution un milieu aérobie très aéré.

C'est aussi le cas des "strongles digestifs", dont les

en larve dans le milieu extérieur.

L'effet de la température est quant à lui beaucoup plus complexe, et nécessite une étude plus approfondie.

2-5-1 Effet de la température sur les micro-organismes.

Nous avons vu dans l'étude de l'ensemencement bactérien de la fermentation méthanique, qu'il existait trois sortes de populations bactériennes en fonction de la température à laquelle on se trouve. Il en est de même pour tous les micro-organismes. Ces trois sortes de populations bactériennes sont définies par des températures minimum, optimum et maximum de croissance, dont les valeurs ont déjà été données dans le paragraphe 1-5-2. Notons tout de suite que les valeurs de ces températures ne sont valables que dans les conditions très précises où elles ont été déterminées. Des variations des conditions du milieu (pH, concentration en différents sels...) peuvent modifier énormément ces valeurs. Au dessus de la température maximale de croissance, nous pouvons déterminer le "thermal death rate" ou point de mort thermique, température à laquelle un organisme est tué après exposition de 10 mn, ceci dans des conditions bien définies évidemment. Ce point de mort thermique peut varier en fonction de nombreux facteurs (Salle 1967) :

- + l'humidité du milieu, qui affecte la température de coagulation du protoplasme des micro-organismes. Si elle augmente on observe une diminution, dans certaines limites, de la température mortelle. Pour illustrer ceci, Salle cite l'exemple de l'albumine d'oeuf, qui, desséchée, peut-être chauffée à une température de décomposition sans montrer de signes de coagulation, alors que, quand elle contient 50 % d'eau, elle coagule à 56°C.

- + la teneur en eau des micro-organismes, qui, quand elle augmente, diminue la résistance aux températures élevées.

- + le pH. La résistance de nombreux micro-organismes est diminuée en milieux acides ou alcalins. Elle est en général maximale au pH neutre.

+teneur du milieu en protéines. Si elle est importante, la résistance des micro-organismes est augmentée, il semblerait que les protéines forment un film protecteur autour des bactéries.

+l'âge des micro-organismes. En général, leur résistance augmente avec l'âge.

Les possibles changements de ces conditions dans un réacteur font qu'il est difficile de comparer strictement les normes de stérilisation de telle ou telle bactérie avec les températures régnant dans les digesteurs pour savoir si ces bactéries ou virus seront détruits lors de leur passage dans le digesteur.

Certains de ces micro-organismes seront détruits sûrement alors que pour d'autres, les températures de fermentation et de destruction seront si proches que seules des expérimentations pourront permettre de vérifier si oui ou non ils sont détruits.

2-5-2 Relations mathématiques concernant l'action de la chaleur sur les micro-organismes

2-5-2-I Relation entre la température et la durée de chauffage

L'application de la chaleur doit tenir compte de ces deux paramètres, entre lesquels il existe une relation logarithmique

si l'on applique la température T_0 pendant un temps t , on obtient un résultat X .

si l'on applique la température $T_0 + x_0^{\circ}\text{C}$ pendant le temps $t-z$, on obtient le même résultat X .

si l'on applique la température $T_0 + 2x_0^{\circ}\text{C}$ pendant un temps $t-y$, on obtient encore le résultat X .

On s'aperçoit alors que y est très supérieur à $2z$.

Donc, quand la température augmente légèrement, le temps d'application nécessaire à l'obtention d'un même résultat diminue de beaucoup. Inversement, si le temps d'application reste constant, le résultat obtenu sera très supérieur pour la même légère augmentation de température.

2-5-2-2 Relation entre la durée du chauffage et l'efficacité du traitement thermique.

Dans une même souche d'une même espèce bactérienne, on constate que si l'on chauffe à température T fixe pendant un temps t puis $2t, 3t, 4t, \dots$, en partant d'une population initiale comptant 10^{+5} germes par ml, on obtient les résultats suivants:

T pendant t , population passe de 10^{+5} à 10^{+4} germes/ml, ce qui correspond à une destruction de 90 000 germes.

T pendant $2t$, population passe de 10^{+4} à 10^{+3} germes/ml, donc destruction de 9 000 germes.

T pendant $3t$, population passe de 10^{+3} à 10^{+2} germes/ml, donc destruction de 900 germes.

T pendant $4t$, population passe de 10^{+2} à 10^{+1} germes/ml, donc destruction de 90 germes.

T pendant $5t$, population passe de 10^{+1} à 1 germe/ml, donc destruction de 9 germes.

T pendant $6t$, population passe de 1 à 10^{-1} germes/ml.

La réduction du nombre de germes est donc logarithmique. Ceci s'explique par le fait que dans une même espèce bactérienne et une même souche, toutes les bactéries n'ont pas la même thermosensibilité.

La désinfection n'est donc pas un processus soudain mais plutôt une opération graduelle, l'efficacité du traitement thermique diminuant au fur et à mesure que l'on s'approche de la perfection.

Cette relation explique aussi pourquoi il est plus facile de stériliser des gros volumes que des petits. Hormis le fait que la température au centre de la masse n'est pas tou-

jours égale à celle mesurée sur les bords, plus le volume est grand, plus il y aura de micro-organismes avant le traitement, donc plus les chances d'en trouver après le traitement sont grandes. Dans l'exemple ci-dessus, au bout du temps 6t, nous avons 10^{-1} germes/ml, ce qui veut dire que sur dix échantillons de 1 ml, nous aurons dans un des échantillons un germe. Dans un volume de 10 ml nous aurions un germe, alors que si nous partions d'un volume de 100 ml, la probabilité serait de trouver 10 germes.

Dans le grand volume d'un digesteur, on n'est donc jamais sûr d'une destruction totale des micro-organismes, mais suivant la thermosensibilité moyenne de l'espèce et de la souche considérée, une plus ou moins grande partie de la population sera détruite.

2-5-3 Conclusions

2-5-3-I Cas des parasites (Euzéby 1961)

Dans les déjections des animaux domestiques, nous trouvons souvent des formes libres de certains parasites. Ces formes libres sont soit des oeufs, soit des larves pour les métazoaires, et certaines formes spéciales pour les protozoaires: ookystes des coccidies par exemple.

+Les larves sont toujours plus fragiles que les oeufs. De plus leur développement implique la présence d'oxygène.

Leur température optimale de développement est généralement faible et elles sont assez rapidement anéanties à des températures de l'ordre de 35 à 40°C. C'est ainsi que pour *Dictyocaulus viviparus*, agent de la bronchite vermineuse des bovins, la température maximale de survie est de 37°C, ce qui explique les résultats obtenus par l'éleveur Danois cité plus haut, d'autant que cette température est appliquée pendant au moins trois semaines (fermentation mésophile).

+La résistance des oeufs est, quant à elle, beau-

coup plus variable. La littérature cite des températures allant de 35 à 50°C, pour des durées d'exposition également variables.

Citons quelques grandes endémies: les oeufs de la grande douve du foie, *Fasciola hepatica*, ne résisteraient pas trois semaines à 37°C, alors que la destruction de ceux de la petite douve, *Dicrocoelium lanceolatum*, nécessite un passage de 24 heures à 50°C.

Pour les "strongles digestifs" dont les oeufs n'avaient pas évolué en larves lors de l'entrée dans le digesteur, leur destruction implique une exposition d'une cinquantaine de jours à 33°C (cas d'*Ostertagia ostertagi*).

Les oeufs des trichures parasitant les bovins et les porcs sont détruits après 12 jours à 50°C, tandis que ceux des ascaris le sont après 7 à 8 heures à la même température.

+ les ookystes, formes libres des coccidies notamment, ne résistent pas bien à la chaleur non plus. Ils sont théoriquement détruits après une courte exposition aux alentours de 60°C.

D'après ces quelques exemples, nous pouvons penser que la fermentation exerce bel et bien un effet stérilisateur sur de nombreux parasites. Pourtant celui-ci ne semble que partiel dans le cas de la fermentation en mésophilie, les températures de destruction de certains parasites étant trop proches de celles régnant dans le digesteur. De plus quand la zone de destruction annoncée est de 7 à 8 heures à 50°C (cas des oeufs d'ascaris), il n'a pas été prouvé que le même effet sera obtenu à 37°C pendant 22 à 30 jours.

Il apparaît donc, qu'au plan parasitaire, la stérilisation de la biomasse sera beaucoup plus poussée en fermentation thermophile que mésophile. Dans ce deuxième cas l'on ne peut être sur que de la destruction des formes larvaires.

2-5-3-2 Cas des bactéries et des virus

Les micro-organismes pathogènes appartiennent aux populations mésophiles, du fait même de leur adaptation à la vie chez leurs hotes qui dans les cas que nous étudions sont homéothermes.

37°C est donc le plus souvent leur température optimale de croissance. La fermentation en mésophilie ne pourra donc pas détruire les populations microbiennes pathogènes. Au contraire certaines d'entre elles, celles qui peuvent vivre en anaérobiose, pourront même cultiver dans le digesteur.

Par contre, Le Guyon (1960) pense qu'à 56-57°C, l'immense majorité des microbes pathogènes sont détruits. Il existe bien sur des exceptions, à commencer par tous les micro-organismes capables de sporuler, dont la destruction impliquerait l'utilisation d'un autoclave, exemple *Clostridium botulinum*, *Bacillus anthracis*,...

Le bacille tuberculeux, *Mycobacterium tuberculosis*, résiste aussi, il n'est détruit qu'après un passage de une demi-heure à 70°C

Mais nombreuses sont les bactéries dont les températures de destruction se situent aux alentours de 55°C. Les Salmonelles sont détruites à partir de 50°C, les Colibacilles après exposition pendant une heure à 56°C. Les Leptospires sont également fragiles et sont détruits en 30 minutes à 45°C.

Les virus aussi sont détruits aux environs des mêmes températures, on observe également les mêmes variations de résistance suivant l'espèce considérée. L'Herpes virus de la maladie d'Aujeszky est tué en 30 minutes à 56°C, alors qu'il ne faut que 5 minutes à 55°C pour obtenir le même résultat avec le virus rabique.

La fermentation méthanique en thermophilie devrait donc permettre une stérilisation assez poussée de la

biomasse introduite dans le digesteur et ceci tant aux plans parasitaires que microbiologiques, avantages que l'on ne retrouve pas en mésophilie.

CONCLUSIONS

Avec l'augmentation du nombre d'animaux par élevage et la concentration de ceux-ci dans des zones géographiquement limitées, une modification du rôle et de l'attitude du vétérinaire attaché à ces élevages s'impose. Le vétérinaire thérapeute soignant l'animal en tant qu'individu s'efface devant l'analyste qui cherche à avoir une vision d'ensemble non seulement du troupeau, mais aussi des bâtiments d'élevage, des conditions de vie des animaux et des structures de l'élevage. La thérapeutique individuelle est délaissée au profit d'une prophylaxie à la fois médicale et sanitaire. Dans ses rôles de nutritionniste, de conseiller de la reproduction, le vétérinaire devient ainsi un économiste.

C'est sous cet aspect de sa formation qu'il lui importe de connaître la fermentation méthanique. Grâce, d'une part à la production de biogaz qui devient intéressante actuellement au plan économique, et d'autre part grâce aux revenus complémentaires et économies procurées par les boues fermentées, cette technique entre parfaitement dans la gamme de possibilités que le vétérinaire doit pouvoir présenter et conseiller à l'éleveur. Parallèlement, de par la stérilisation du résidu de fermentation et son aspect alimentaire, cette technique est aussi du domaine du nutritionniste et du "prophylactiseur".

Ceci amène à penser que, de en plus en plus, nous devons essayer d'avoir une vision des élevages sous un aspect écologique, impliquant une utilisation poussée des produits de la terre, une valorisation des déchets agricoles et un retour aux sols des déchets finaux, le

tout dans un esprit d'autonomie de l'agriculture, tant au plan de la matière qu'à celui de l'énergie. Ceci est en accord avec la conception thermodynamique des cycles vivants: la matière végétale, grâce à la photosynthèse, est formée à partir de corps élémentaires, puis est consommée pour servir à l'élaboration d'autres organismes vivants. Ces développements cellulaires allant dans le sens d'une organisation croissante, sont endothermiques, alors que les phénomènes de dégradation microbienne de tous ces organismes et de leurs excréments, aboutissant de nouveau aux corps élémentaires, sont exothermiques, ou peuvent engendrer de l'énergie sous d'autres formes, du méthane par exemple. L'absence ou la défaillance d'un des maillons dans de tels cycles provoque une accumulation d'excréments, donc une pollution. L'action proposée, à laquelle nous voyons une participation active de la profession vétérinaire, se situe donc dans une perspective d'organisation écologique de la production animale.

Vu :

LE DIRECTEUR

de l'École Nationale Vétérinaire de Lyon,



LE PROFESSEUR RESPONSABLE
de l'École Nationale Vétérinaire,



LE PRÉSIDENT DE LA THÈSE,



Vu et permis d'imprimer

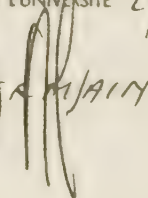
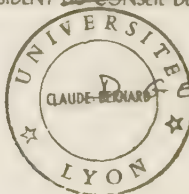
6 MARS 1980

LYON, le

19

LE RECTEUR, PRÉSIDENT DU CONSEIL DE L'UNIVERSITÉ

LYON I



BIBLIOGRAPHIE

LECOMTE et coll.

"Aide mémoire Dunod - Agriculture"

Dunod, 92 rue Bonaparte. PARIS VI . 1947

LESAGE et ABIET

"Gaz de fumier. Dernières techniques de production et d'utilisation"

Soissons. La diffusion nouvelle du livre. 1952

LE GUYON

"Précis de bactériologie"

G.DOIN et cie, 8place de l'odéon, PARIS VI. 1960

EUZEBY

"Maladies vermineuses des animaux" Tomes I et II

Vigot frères, 23 rue de l'école de médecine,

PARIS VI. 1961

SALLE

"Fundamental principles of bacteriology" 6th edition.

Mac Graw Hill, LONDON. 1967

DUTHILL

"Eléments d'écologie et d'agronomie"

Editions J.B.Baillière, 19 rue Hautefeuille,

PARIS VI. 1973

FRY, JOHN and MERRIL

"Methane digester for fuel gas and fertilizer"

New Alchemy Institute West Newsletter n°3. 1973

LES AUERBACH

"A home site power unit: methane generator"

Alternative energy systems. Les Auerbach, 242

Copse road, Madison, Ct 06443 U.S.A. 1973

BALLAY et STAMBOLI

"Porcherie et environnement"

Institut Technique du Porc, série III. 1974

GIBBONS, CATCOTT, SMITHCORS et coll.

"Médecine et chirurgie des bovins"

Vigot frères, 23 rue de l'école de médecine,
PARIS VI. 1974

MINISTERE DE LA COOPERATION

"Memento de l'agronome"

Ministère de la coopération, 57 bd des invalides,
75357 PARIS CEDEX 07. 1974

MOLLO-MOLLO

"L'énergie c'est vous"

Collection Vivre, Stock 2. 1974

ECOTOPE GROUP and PARAMETRIX Inc.

"Process feasibility study: the anaerobic digestion of dairy cow manure at the state reformatory honor farm, Monroe, Wash."

Ecotope Group, box 618, Snohomish Wash. U.S.A. 1975

BLOOD et HENDERSON

"Médecine vétérinaire"

Vigot frères, 23 rue de l'école de médecine,
PARIS VI. 1976

ISMAN

"Energie solaire: utilisation de l'énergie solaire dans les pays en développement, par l'intermédiaire de la photosynthèse et de la fermentation méthanique
Communication au congrès international "Sciences et techniques au service des pays en développement". Palais de l'UNESCO, PARIS. 9 au 14/5/1976

SCHROEDER

"Use of fresh and fermented cow manure in fish culture at Maagan Michael"

Research and Development Institute, Kibbutz
Industrie Association, Israël . 1976

SHARMA et PAUL

"Studies on biogas sources"

Curr. Sci., 1976, 45, n°10, p. 376-377

DREVON et ISMAN

"Fiches T55, T56 et TI24 du G.R.E.T."

Groupe de Recherches sur les Techniques rurales
34 rue Dumont d'Urville, 75116 PARIS. 1977

PREVOT

"Biosynthèse bactérienne du méthane et des pétroles
pour l'an 2000"

Maloine S.A. Editeur. 1977

KEENAN

"Biomass resources and conversion to fuels"

Presented at the symposium: Alternative Resources
and Technologies for Fuel Production. University
of Pittsburg, Pennsylvania, July 3, 1978

MARCHAIM

"Utilization of agricultural waste in Israël"

Research and Development Institute, Kibbutz In-
dustries Association, Israël. 1978

PFULG

"Les mille et un sentiers de l'énergie"

Cérès, 1978, II, n°5, p. 19 à 22

VERRIER

"Valorisation énergétique des déchets agricoles
par la fermentation méthanique. Etude d'un diges-
teur pilote. Enseignements pratiques."

I.N.R.A.-C.N.R.S. Station élevage porcs,
78350 JOUY EN JOSAS. 1978

COMITE VALORISATION ENERGETIQUE DES DECHETS AGRI-
COLES (V.E.D.A.)

"Valorisation énergétique des sous produits
agricoles, résultats et bilans des actions du
comité V.E.D.A."

Association pour la promotion Industrie-Agri-
culture, PARIS. 1979

KOVS

"Energie verte,renaissance du gaz de fumier"
Sciences et Vie, hors série, n°126, p.141 à 143

PRIOR,et HASHIMOTO

"Potential for fermented cattle residue as a feed
ingredient for livestock"
Roman L. Hruska U.S. Meat Animal Research Center.
Agricultural Research Science and Education Admini-
stration. U.S. Department of Agriculture,Clay cent
Nebraska 68933 U.S.A. 1979

